

doi:10.15199/48.2017.07.14

Badanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych pod kątem możliwości ich wykorzystania w rozłożonych czujnikach temperatury z rozproszeniem Rayleigha

Streszczenie. W części teoretycznej niniejszej pracy przedstawiono definicję, budowę, zasadę działania, parametry oraz obszary zastosowań światłowodowego rozłożonego czujnika temperatury wykorzystującego w swym działaniu wymuszone rozproszenie Rayleigha. Praktyczna część pracy zawiera wyniki eksperymentów polegających na badaniu wpływu temperatury na wartość tłumienia jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego, w zależności od jego standardu oraz długości fali świetlnej – okna pomiarowego. Zawiera ona również analizę uzyskanych wyników i wynikające z niej wnioski.

Abstract. In the theoretical part of this work are presented the definition, design, operation, parameters and application areas of fiber optic distributed temperature sensor uses in its operation forced Rayleigh scattering. The practical part of the work contains the results of experiments involving the study of the effect of temperature on attenuation value of single mode optical fiber depending on the standard and the wavelength – measurement window. It also includes an analysis of the results and conclusions. (The study of the single mode optical fiber for the possibility of their use in the distributed temperature sensors with Rayleigh scattering)

Słowa kluczowe: światłowodowy czujnik temperatury, jednomodowe włókno światłowodowe, reflektometr optyczny, tłumienie światłowodu, straty materiałowe

Keywords: fiber optic temperature sensor, single mode optical fiber, optical reflectometer, attenuation, material losses

Wstęp

Obecnie, rozłożone światłowodowe czujniki temperatury, o przetwarzaniu wewnętrznym, zyskują coraz większą popularność. Możliwość przetwarzania w sposób ciągły wielkości mierzonej na znacznych odległościach sprawia, że są one alternatywą dla wielopunktowych czujników konwencjonalnych. Dodatkowo, czujniki światłowodowe przewyższają klasyczne rozwiązania odpornością na warunki środowiskowe, a także na zakłócenia, których źródłem mogą być sieci przesyłowe. Charakteryzują się one prostotą swej budowy.

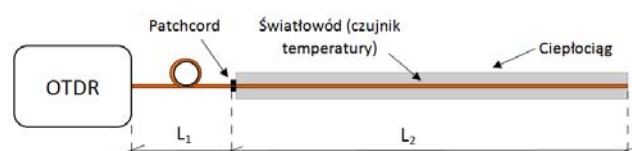
Największym problemem tej technologii jest otrzymanie dużej czułości przetwarzania wraz z wysoką rozdzielczością przestrzenną. Problematykę rozdzielczości przestrzennej rozwiązuje reflektometr optyczny, natomiast duża czułość temperaturowa jest widoczna przy domieszkowaniu rdzenia światłowodu pierwiastkami ziem rzadkich – neodymem (Nd) bądź holmem (Ho) [1].

Podstawowymi zjawiskami występującymi w światłowodach i wykorzystywanymi podczas działania rozłożonych czujników temperatury są: rozproszenie Rayleigha, rozproszenie Ramana, rozproszenie Brillouina, efekt Kerra oraz mieszanie czterofalowe (FWM).

W niniejszej pracy skupiono się na światłowodowym czujniku temperatury, wykorzystującym rozproszenie Rayleigha. Wynika to z faktu dostępności aparatury pomiarowej, w celu przeprowadzenia stosownych eksperymentów, aby stwierdzić, czy jednomodowe światłowody telekomunikacyjne (wg ITU-T oznaczane jako G.652, G.653, G.655, G.657A i G.657B) mogą być wykorzystywane do budowy światłowodowych rozłożonych czujników temperatury.

Budowa, zasada działania, parametry oraz obszary zastosowań światłowodowego rozłożonego czujnika temperatury

Czujnik temperatury (rys. 1.) jest to światłowód – fizyczny falowód optyczny, w którym zmiana temperatury wywołuje rozproszenie Rayleigha. Mamy więc do czynienia z tzw. wymuszonym rozproszeniem Rayleigha, w miejscach gdzie wystąpiły zmiany temperatury.

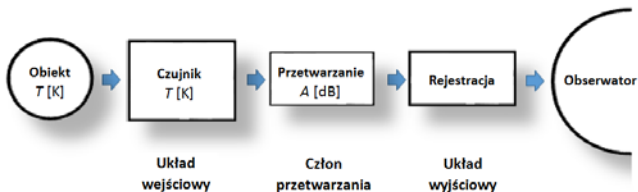


Rys.1. Światłowodowy czujnik temperatury badający zmiany temperatury na całej długości ciepłociągu: L_1 – początek światłowodu, tak zwana strefa martwa czujnika, o długości od kilku do kilkudziesięciu metrów, L_2 – długość światłowodu stanowiącego czujnik temperatury

Do pomiaru wykorzystywany jest reflektometr optyczny, który stanowi część nadawczo-odbiorczą. Na reflektometrze można zaobserwować liniowy przebieg krzywej tłumienia sygnału na całej długości czujnika światłowodowego. Wszelkie zmiany w liniowej charakterystyce wywołane są przez nieprawidłowości w torze czujnika temperatury. Owe defekty (nieprawidłowości) wywołane są przez nieciągłość włókna światłowodowego (złączki, spawy itp.), czynniki zewnętrzne (temperatura, ciśnienie itp.) oraz mikrozgięcia i makrozgięcia [1,2,3]. W celu otrzymania wzorcowego reflektogramu istotne jest, aby zbadać reflektometrem optycznym czujnik światłowodowy przed i po zamontowaniu na kontrolowany przez czujnik element (np. ciepłociąg). Proces ten umożliwia kontrolowanie stanu samego czujnika i ciepłociągu. Reflektometrem można badać czujnik temperaturowy o długości dochodzącej nawet do kilkaset kilometrów [2], a zależy to od dynamiki użytego reflektometru.

Ciąg przetwarzania czujnika jest przedstawiony na rysunku 2. Jak widać ma on strukturę łańcuchową, ponieważ tor pomiarowy (ciąg przetwarzania) czujnika nie jest rozgałęziony (nie ma w nim węzłów sumacyjnych, a wszystkie procesy przetwarzania zachodzą od wejścia do wyjścia układu pomiarowego).

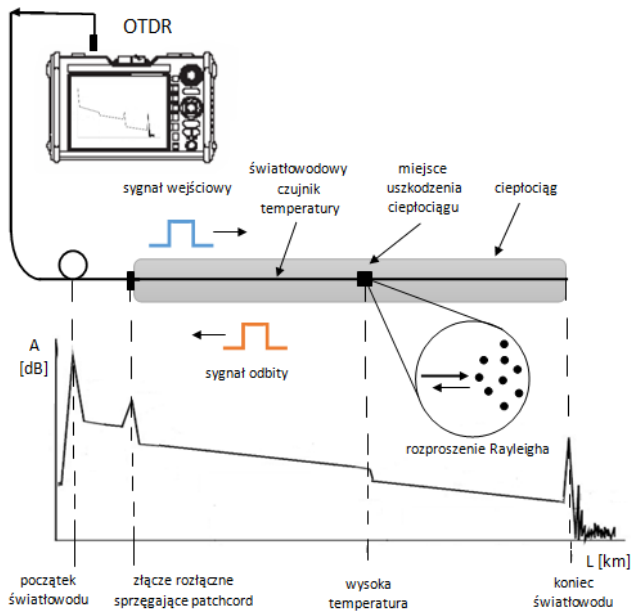
W światłowodowych czujnikach temperatury z rozproszeniem Rayleigha, bada się zachodzące fluktuacje współczynnika załamania, które są spowodowane zmianami gęstości i składu materiału. Są one niewielkie w stosunku do długości fali i dlatego światło ulega na nich małemu rozproszeniu.



Rys. 2. Tor pomiarowy (ciąg przetwarzania) o strukturze łańcuchowej dla światłowodowego czujnika temperatury: obiekt – ciepociąg, czujnik – włókno światłowodowe, przetwarzanie – reflektometr optyczny, rejestracja – komputer klasy PC, obserwator – osoba wykonująca pomiar

W rozpatrywanym czujniku mamy do czynienia z wymuszonym rozproszeniem Rayleigha, ponieważ zmiana współczynnika załamania wywołana jest zmianą temperatury. W punkcie światłowodu, gdzie zmienia się temperatura zmienia się gęstość i skład materiału, a co za tym idzie fotony są tam pochłaniane i wypromieniowywane w dowolnym kierunku, bez straty energii [2,3,4]. Powstające w ten sposób wsteczne rozproszenie ma tę samą długość fali świetlnej co światło padające (wprowadzane z reflektometru do światłowodu).

W celu odczytania parametrów charakterystycznych rozproszenia stosuje się reflektometr optyczny, działający w dziedzinie czasu (OTDR). Za jego pomocą dokonywany jest pomiar mocy rozproszenia wstecznego Rayleigha. W celu przeprowadzenia pomiaru, w układzie przedstawionym na rysunku 3, do światłowodu są wprowadzone impulsy świetlne. Reflektometr mierzy czas jaki upłynął między pierwotnym sygnałem świetlnym, a sygnałem odbitym od niejednorodności, przeliczając czas na odległość oraz wartość strat wywołanych wielkością mierzoną. Natężenie wstecznego rozpraszania w czujniku rozłożonym jest proporcjonalne do współczynnika wstecznego rozproszenia [2].



Rys. 3. Schemat działania światłowodowego czujnika temperatury z odniesieniem charakterystycznych punktów na krzywej tłumienia wyświetlanej przez reflektometr

W oparciu o analizę krzywej reflektometrycznej (reflektogramu) można określić miejsce, w którym wystąpiła zmiana temperatury (rozdzielczość przestrzenna), a po wcześniejszej kalibracji można ocenić wartość temperatury, na podstawie pomiaru tłumienia zdarzenia (rozdzielczość temperaturową).

Światłowodowy czujnik temperatury jest przetwornikiem temperatura – tłumienie ($T - A$). Umożliwia on, w sposób pośredni, pomiar wartości chwilowej temperatury, którą można określić na podstawie wartości tłumienia. Zależność między tymi dwiema wielkościami nie jest opisana w sposób analityczny. Oznacza to, że przed uruchomieniem czujnika należy przeprowadzić jego kalibrację – wyznaczyć eksperymentalnie statyczną charakterystykę przetwarzania $T = f(A)$.

Na podstawie wyznaczonej charakterystyki statycznej przetwornika $T - A$ można określić jego czułość statyczną, która jest rozumiana jako granica stosunku przyrostu wielkości wyjściowej – tłumienia, do wywołującego tę zmianę przyrostu wielkości wejściowej – temperatury [5]. Opisuje to zależność:

$$(1) \quad S = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta A}{\Delta T} = \frac{\partial A}{\partial T} \text{ [dB/K]}$$

Rozpatrywany czujnik temperatury posiada, poza czułością statyczną – temperaturową, czułość przestrzenną, która zależy od zastosowanego reflektometru światłowodowego. Jej wartość wynika z klasy reflektometru, na podstawie której można wyznaczyć błąd z jakim określana jest pozycja zdarzenia na reflektogramie [2,9]. Należy zaznaczyć, że zdarzenie symbolizuje miejsce, w którym zmiane ulega temperatura.

Z budowy światłowodowego czujnika temperatury oraz parametrów reflektometru światłowodowego wynika opóźnienie wprowadzane przez ten czujnik – czas reakcji pomiędzy zmianą temperatury, a odpowiedzią czujnika w postaci zmiany tłumienia. Występujące opóźnienie wynika z czasu jaki potrzebuje światło na przebycie drogi od reflektometru do miejsca zmiany temperatury (L), gdzie wystąpi wymuszone rozproszenie Rayleigha i z powrotem oraz z opóźnienia wprowadzonego przez detektor światła w OTDR, który pracuje w czasie rzeczywistym i na bieżąco można dokonywać pomiaru tłumienia oraz lokalizacji zdarzenia. Prędkość rozchodzenia się światła w rdzeniu światłowodu można wyznaczyć z następującego wzoru [5]:

$$(2) \quad v = \frac{c}{n_1} \text{ [km/s]}$$

gdzie: c – prędkość światła w próżni, n_1 – współczynnik załamania w rdzeniu światłowodu.

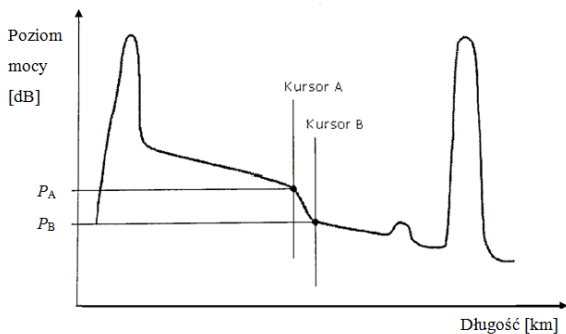
Analizując wzór (2), można zauważyć, że prędkość rozchodzenia się światła w rdzeniu światłowodu, zależy od wartości współczynnika załamania w jego rdzeniu, a co za tym idzie od standardu jednorodowego światłowodu telekomunikacyjnego [5]. Dysponując tą prędkością można określić opóźnienie wprowadzane przez zrealizowany system pomiarowy [5]:

$$(3) \quad \tau = \frac{2 \cdot L}{v} + \tau_{RE} \text{ [s]}$$

gdzie: τ_{RE} – opóźnienie wprowadzane przez detektor światła, którego wartość nie przekracza $10 \mu\text{s}$ [6] (obecnie stosowane fotodetektory wprowadzają opóźnienie równe około $0,15 \mu\text{s}$). Oczywistym jest, że wraz ze wzrostem odległości od miejsca, w którym występuje zmiana temperatury do reflektometru rośnie również opóźnienie.

Metody reflektometryczne wykorzystywane do pomiaru tłumienia

Do pomiaru tłumienia przy użyciu reflektometru optycznego (OTDR) wykorzystuje się metodę dwupunktową (2PA) bądź metodę czteropunktową (LSA) [2,3,8].



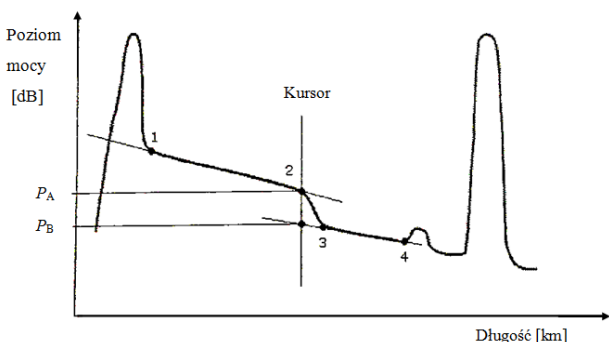
Rys. 4. Reflektogram ilustrujący metodę dwupunktową [2,3,7,8]

Punkty naniesione kursorami A i B (rys. 4.) na reflektogramie odpowiadają poziomom mocy optycznej P_A i P_B .

Dwupunktowe pomiary strat związane są z obliczeniem różnicy pomiędzy poziomami mocy dla każdego z dwóch punktów wzdłuż światłowodu. Do parametrów tłumieniowych linii w metodzie dwupunktowej, nie jest brany pod uwagę kształt charakterystyki pomiędzy dwoma naniesionymi punktami. Ustawienie punktów kursorami, na nieliniowym przebiegu, ma wpływ na dokładność pomiarów. Dzięki tej metodzie mamy możliwość zbadania tłumienia na całej długości światłowodu [2,3,8]. Tłumienie wtrącone wyrażamy wzorem [3,8]:

$$(4) \quad A_W = P_A - P_B \quad [\text{dB}]$$

Można zaobserwować, że pomiar strat nie jest aż tak dokładny jak wykonywany specjalistycznym przyrządem do pomiaru strat optycznych (miernikiem mocy optycznej). Reflektometr optyczny bazuje na mocy odbitej wstecz, a nie rzeczywistej mocy transmitowanej. Aby zwiększyć dokładność pomiaru można dokonać badania odcinka światłowodu w obydwu kierunkach a uzyskane wyniki uśrednić arytmetycznie [3,9].



Rys. 5. Reflektogram ilustrujący metodę czteropunktową [2,3,7,8]

Metoda LSA nazwana jest także czteropunktową, ze względu na prostoliniowe odcinki uzyskane dzięki zastosowaniu aproksymacji liniowej dla przedziałów między punktami 1 – 2 i 3 – 4. Punkty przecięcia odcinków aproksymacyjnych z kurorem, ustawionym w miejscu badanego zdarzenia, określają poziomyści mocy optycznej P_A i P_B [3]. Tak jak w przypadku metody dwupunktowej tłumienie wtrącone wyraża się wzorem (4).

Dokładność metody czteropunktowej jest zależna od badanego światłowodu, uściślając od ilości wszystkich zdarzeń zarejestrowanych poprzez reflektometr, ponieważ brane są pod uwagę wszystkie punkty charakterystyki znajdującej się w strefach LSA, to znaczy między punktami 1 – 2 oraz 3 – 4. Podobnie jak w przypadku metody 2PA pomiary należy wykonywać w dwóch kierunkach, a uzyskane wyniki uśrednić arytmetycznie [3,9].

Jak już wcześniej wspomniano pomiaru tłumienia i tłumienności za pomocą reflektometru można dokonywać w oparciu o dwie metody: dwupunktową i czteropunktową. Owe metody mogą powodować powstanie błędów pomiarowych:

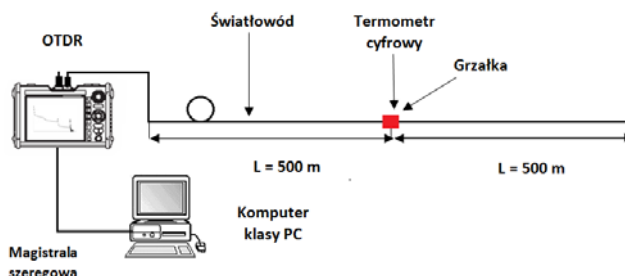
- **metoda dwupunktowa (2PA albo TPA):** do oceny tłumienia albo tłumienności jednostkowej pomiędzy kursorami A i B (rys. 4.) nie są brane zdarzenia, które się pomiędzy nimi znajdują, interesują nas tylko wartości tłumienia w punktach przecięcia się kursorów z krzywą reflektometryczną. Wobec tego na dokładność otrzymanych wyników ma jedynie wpływ usytuowanie kursorów [8],

- **metoda czteropunktowa (LSA):** do oceny tłumienia albo tłumienności odpowiednią parą punktów (rys. 5.) brane są wszystkie dane z charakterystyki reflektometrycznej. Aby otrzymany wynik był jak najbardziej bliski rzeczywistości należy zadbać o to, aby na badanym fragmencie nie było innych zdarzeń, poza badanymi. Metoda ta bardzo dobrze funkcjonuje kiedy mamy mało efektów odbiciowych. W sytuacji, kiedy efektów tych jest dużo (np. w tracie badania całej długości linii światłowodowej) nie powinno się używać tej metody, gdyż do wyniku brane są wartości odbiciowe, które ją zafałszowują [8].

Zalecane jest, aby pomiar tłumienia i tłumienności z wykorzystaniem reflektometru, przeprowadzić w dwóch kierunkach, a otrzymane wyniki uśrednić. Dzięki temu działaniu uzyska się dość reprezentatywny wynik [9], ponieważ składowa błąd spowodowana szumem kwantyzacji zostanie zredukowana.

Badanie i analiza właściwości metrologicznych rozłożonego czujnika temperatury zbudowanego z jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego

Wspomagany komputerowo stanowisko do badania rozłożonych światłowodowych czujników temperatury składało się z następujących elementów: **reflektometru światłowodowego** firmy Anritsu model MW9076D1, który posiada wbudowane przestrajalne źródło światła o liniowej polaryzacji światła, które może pracować między innymi w tzw. II oraz III oknie optycznym, **jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego** różnych standardów (wg ITU-T G.652, G.653, G.655, G.657A, G.657B) scharakteryzowanych w pracach [2,5,8], **komputera klasy PC** ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym zdalne sterowanie reflektometrem światłowodowym, w celu pomiaru tłumienia oraz **termometru cyfrowego** sprzężonego z komputerem klasy PC za pomocą uniwersalnej magistrali szeregowej (USB), współpracującego z generacyjnym (termoparowym) czujnikiem temperatury PtRh18-Pt. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego i rozłożonego światłowodu czujnika temperatury z wymuszonym rozproszeniem Rayleigha

Przed rozpoczęciem pomiarów, gdy temperatura otoczenia wynosiła 23,00 °C (tj. 300 K – temperatura

charakterystyczna dla materiałów optoelektronicznych), należało przeprowadzić proces kalibracji tzn. określić wartość tłumienia światłowodu.

Dodatkowo w miejscu grzania światłowodu (tj. 500 m od jego początku) zainstalowano generacyjny czujnik temperatury PtRh18-Pt, który umożliwia pomiar temperatury.

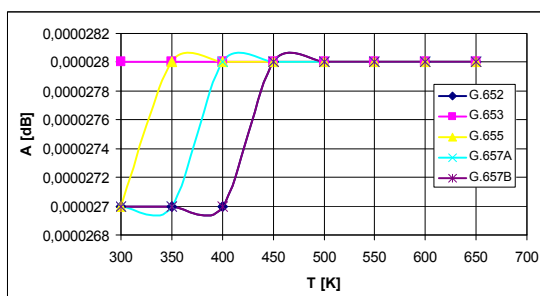
Do badań wykorzystano pięć standardów jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych (wg ITU-T G.652, G.653, G.655, G.657A, G.657B), każdy o długości 1 km.

Tabela 1. Wyniki pomiarów tłumienia w funkcji temperatury dla tzw. II okna optycznego, w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego

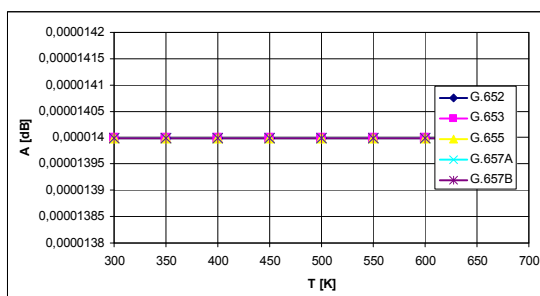
Temperatura T [K]	Tłumienie A [dB]				
	G.652	G.653	G.655	G.657A	G.657B
300	0,000027	0,000028	0,000027	0,000027	0,000027
350	0,000027	0,000028	0,000028	0,000027	0,000027
400	0,000027	0,000028	0,000028	0,000028	0,000027
450	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028
500	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028
550	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028
600	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028
650	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028	0,000028

Tabela 2. Wyniki pomiarów tłumienia w funkcji temperatury dla tzw. III okna optycznego, w zależności od standardu jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego

Temperatura T [K]	Tłumienie A [dB]				
	G.652	G.653	G.655	G.657A	G.657B
300	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014
350	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014
400	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014
450	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014
500	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014
550	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014
600	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014
650	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014	0,000014



Rys. 7. Statyczna charakterystyka przetwarzania – zależność tłumienia od temperatury dla różnych standardów jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego i dla II okna optycznego



Rys. 8. Statyczna charakterystyka przetwarzania – zależność tłumienia od temperatury dla różnych standardów jednomodowego światłowodu telekomunikacyjnego i dla III okna optycznego

Dysponując zbudowanym układem pomiarowym można określić statyczną charakterystykę przetwarzania oraz czułość statyczną. W pomiarach temperatury, wyniki uzyskane z termometru cyfrowego przyjęto jako wartość wzorcową, aby określić zależność tłumienia światłowodu od temperatury. Uzyskane wyniki zawarte są w tabelach 1 i 2. Na ich podstawie wyznaczono charakterystyki statyczne – rys. 7. i rys. 8.

Wnioski

Analizując charakterystyki statyczne zamieszczone na rysunkach 7 i 8 można dostrzec, że dla III okna optycznego w całym zakresie temperatury, dla wszystkich standardów jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych, mamy do czynienia z funkcją stałą, natomiast w II oknie optycznym tłumienie nieznacznie rośnie, dla światłowodów G.652, G.655, G.657A i G.657B, w zakresie temperatur od 300 K do 500K, natomiast jest stałe dla światłowodu G.653 w całym zakresie temperatury, wynika to z faktu, że rdzeń tego światłowodu posiada największe stężenie molowe domieszki GeO₂, w porównaniu do innych standardów jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych [5]. Oznacza to, że czułość wyznaczana na podstawie wzoru (1) jest w przybliżeniu równa zero.

Dodatkowo można stwierdzić, że wraz z wzrostem długości fali świetlnej tłumienie maleje.

Z powyższego wynika, że jednomodowe światłowody telekomunikacyjne nie powinny być wykorzystywane jako rozłożone czujniki temperatury, gdyż na podstawie pomiaru reflektometrycznego nie można określić miejsca wystąpienia zmiany temperatury. Oznacza to, że zaleca się stosowanie światłowodów, których rdzenie domieszkowane są pierwiastkami ziem rzadkich – neodymem (Nd) bądź holmem (Ho) [1].

Jednomodowe światłowody telekomunikacyjne mogą być jedynie wykorzystywane jako czujniki temperatury np. w zbiornikach z cieczą. Wówczas dostrzec można widoczne zmiany tłumienia na całej długości światłowodu.

Autorzy: dr inż. Sławomir Andrzej Torbus, Politechnika Warszawska Filia w Płocku, Łukasiewicza 17, 09-400 Płock, E-mail: storbustorbus@pw.plock.pl

LITERATURA

- [1] Kaczmarek Z., Światłowodowe czujniki i przetworniki pomiarowe. Wydawnictwo PAK, Warszawa (2008)
- [2] Perlicki K., Pomiar w optycznych systemach telekomunikacyjnych, WKŁ, Warszawa (2002)
- [3] Zalewski J., Telekomunikacja światłowodowa – materiały szkoleniowe dla uczestników kursów organizowanych przez WTiE ATR Bydgoszcz. ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz (1997)
- [4] Siuzdak J., Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej. WKŁ, Warszawa (1999)
- [5] Torbus S. A., Projektowanie światłowodów jednomodowych dla celów metrologicznych i ich zastosowanie w czujnikach Faradaya, Wydawnictwa Uczelniane UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz (2014)
- [6] Borczyński J., Dumin P., Milczewski A., Podzespoły elektroniczne, półprzewodniki, WKŁ, Warszawa (1990)
- [7] <http://swiatlowod.w.interia.pl/11b.html>
- [8] Torbus S. A., Pomiar parametrów transmisyjnych w sieciach optotelekomunikacyjnych, Praca magisterska pod kierunkiem dr inż. M. J. Ratuszka, ATR WTiE, Bydgoszcz (2006)
- [9] Dylewicz R., Stopa J., Frodyma R., Patela S.: Problem wiarygodności pomiarów reflektometrycznych tras i sieci światłowodowych, KST, Bydgoszcz (2003)