

Możliwości termicznego łączenia światłowodów jednomodowych wykorzystywanych w metrologii

Streszczenie. W pracy krótko scharakteryzowano jednomodowe włókna światłowodowe, które można wykorzystywać do budowy czujników Faradaya oraz zdalnych systemów pomiarowych i kontrolno-zabezpieczeniowych linii elektroenergetycznych. Scharakteryzowano straty występujące w termicznych połączeniach włókien światłowodowych oraz metodę analizy właściwości tłumieniowych uzyskanych spawów (spoin). Przedstawiono wyniki symulacji komputerowej oraz fizycznych pomiarów dotyczące możliwości łączenia światłowodów jednomodowych różniących się stężeniem molowym domieszki GeO_2 w rdzeniu, średnicą rdzenia oraz profilem współczynnika załamania w rdzeniu.

Abstract. In this paper single mode optical fibers, which can be used to build Faraday sensors and remote measurement and control-protection systems of power lines are briefly characterized. Losses occurring in thermal connections of optical fibers and the method of analysis of attenuation properties of obtained welds have been characterized. The results of computer simulation and physical measurements concerning the possibilities of combining single mode fibers with differing molar concentration of GeO_2 admixture in the core, core diameter and the refractive index profile in the core are presented. (**Possibilities of thermal connection of single mode fibers used in metrology**)

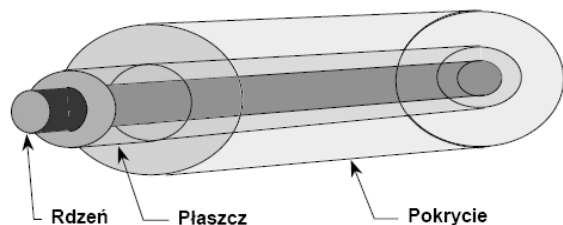
Słowa kluczowe: spaw łukiem elektrycznym, światłowodów jednomodowy, straty tłumieniowe, system pomiarowy i kontrolno-zabezpieczeniowy, światłowodowy czujnik Faradaya

Keywords: welding of electric arc, single mode optical fiber, attenuation losses, measurement and control-protection system, Faraday fiber optic sensor

Wstęp

Fizyczny falowód optyczny (falowód włóknisty, światłowód) jest złożony z dwóch warstw, które charakteryzują się różnymi współczynnikami załamania. Jest to więc cienkie wielowarstwowe włókno dielektryczne [1,2], którego wewnętrzna, centralnie położona warstwa szkła zwana rdzeniem jest pokryta ściśle przylegającą warstwą szkła zwaną płaszczem. Rdzeń ma znormalizowaną średnicę mieszczącą się w przedziale od 5 μm do 11 μm i charakteryzuje się wyższym współczynnikiem załamania – n_1 niż warstwa otaczająca – płaszcz o średnicy 125 μm i współczynnika załamania – n_2 [1,3], aby na zasadzie całkowitego wewnętrznego odbicia można realizować w nim transmisję.

We włóknach światłowodowych można dodatkowo wyróżnić trzecią warstwę, która stanowi powłokę ochronną, nazywaną pierwotną warstwą ochronną bądź pokryciem zewnętrznym. 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.) posiada łączną średnicę 250 μm [3,4].



Rys. 1. Budowa włókna światłowodowego [wyniki własne]

Podstawowym materiałem, z którego wykonywane są światłowody jednomodowe, jest krzemionka SiO_2 , która jest domieszkowana w celu otrzymania odpowiedniego współczynnika załamania. Stosuje się domieszki takich pierwiastków jak: bor (B), fluor (F), glin (Al), fosfor (P), german (Ge), tal (Tl), i inne [2,5]. W optoelektronice światłowodowej można wyróżnić dwie techniki realizacji jednomodowych włókien światłowodowych:

- rdzeń wykonany z czystej krzemionki SiO_2 , natomiast płaszcz wykonany jest ze szkła typu $\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ lub $\text{SiO}_2\text{-F}_2$, które stanowi materiał o współczynniku załamania mniejszym prawie o 1% [2,6]. Rozwiązanie to jest stosowane bardzo rzadko,
- płaszcz wykonany jest z czystej krzemionki SiO_2 , natomiast rdzeń wykonany jest z krzemionki SiO_2 domieszkowanej GeO_2 , P_2O_5 , TlO_2 lub Al_2O_3 [2,6]. Domieszki te powodują zwiększenie współczynnika załamania ponad 1%. Rozwiązanie to jest najczęściej stosowane, a w szczególności przypadek, gdy rdzeń wykonany jest ze szkła typu $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$.

Przez mod rozumie się 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 tylko jeden mod nazywany modem podstawowym albo zwyrodniałym i oznaczanym LP_{01} (HE_{11}), natomiast mody boczne są bardzo silnie tłumione. Dodatkowo należy zaznaczyć, że światłowody jednomodowe są projektowane w taki sposób, aby pozostawały jednomodowe w orientacyjnym przedziale długości fali świetlnej od 1200 nm do 1750 nm [1,7], gdzie tłumienność jednostkowa krzemionki wolnej od jonów wodorotlenkowych OH^- oraz krzemionki ze zredukowaną liczbą jonów Fe^{2+} i Cu^{2+} poniżej 1 ppb (part per billion) jest mniejsza od 0,5 dB/km.

Materiały, z których wykonywane są jednomodowe włókna światłowodowe, charakteryzują się więc wysoką klasą czystości, a co za tym idzie absorpcja (pochłanianie), która jest główną przyczyną tłumienności, jest zredukowana do minimum. Dzięki temu dla tzw. II okna optycznego (1310 nm) uzyskuje się tłumienność jednostkową 0,4 dB/km, a dla tzw. III okna optycznego (1550 nm) wynosi ona $0,2 \pm 0,25$ dB/km.

Obecnie, na rynku optoelektroniki światłowodowej, wyróżnia się jednomodowe światłowody nieodporne (wg ITU-T G.652, G.653 i G.655) i odporne (wg ITU-T G.657) na zginanie. Mogą być one stosowane do budowy czujników wykorzystujących w swym działaniu

magnetoptyczne zjawisko Faradaya oraz światłowodowych systemów pomiarowych i kontrolno-zabezpieczeniowych linii elektroenergetycznych [8,9,10,11].

Jednomodowe światłowody odporne na zginanie wykonywane są w nanotechnologii, co diametralnie zwiększa koszt światłowodowego systemu pomiarowego. Zatem w celu minimalizacji kosztów można wykonać sam czujnik z jednomodowego światłowodu odpornego na zginanie, natomiast jego połączenie ze źródłem światła oraz układem odbiorczym może być zrealizowane przy użyciu jednomodowego światłowodu nieodpornego na zginanie.

Celem pracy była ocena możliwości termicznego łączenia jednomodowych światłowodów nieodpornych i nieodpornych na zginanie pod kątem ich wykorzystania w metrologii

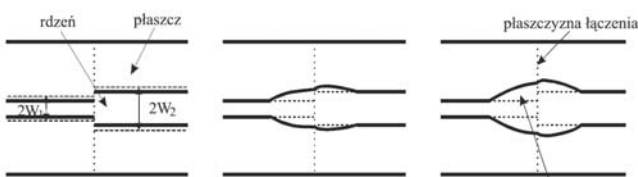
Charakterystyka strat występujących w termicznych połączeniach jednomodowych włókien światłowodowych

Podczas termicznego łączenia światłowodów jednomodowych, przy założeniu braku występowania obszaru przejściowego pomiędzy włóknami, straty mogą być spowodowane niedopasowaniem promieni pól modowych lub przesunięciem osi (rys. 2.).



Rys. 2. Źródła strat w termicznych połączeniach światłowodów jednomodowych: a) niedopasowanie promieni pól modowych światłowodów, b) przesunięcie osi światłowodów [7]

Przeprowadzając spajanie światłowodów łukiem elektrycznym można wyeliminować wpływ przesunięcia osi światłowodów poprzez zastosowanie odpowiedniej techniki centrowania włókien. Oznacza to, że najczęstszą przyczyną strat w spoinie jest niedopasowanie promieni pól modowych. Aby ją częściowo wyeliminować, podczas procesu termicznego łączenia (spajania łukiem elektrycznym), należy wytworzyć, metodą kontrolowanej dyfuzji domieszki rdzeniowej, obszar termicznego rozdyfundowania domieszki, w którym następuje dopasowanie pól modowych [7,19,20] (rys. 3.). Dzięki temu uzyskuje się minimalizację tłumienia obszaru przejściowego termicznie rozdyfundowanej domieszki – TRD.



Rys. 3. Schematyczna prezentacja powstawania termicznie rozdyfundowanej domieszki – TRD [7]

Z powyższego wynika, że zjawisko dyfuzji polegające na samoistnym, chaotycznym rozprzestrzenianiu się cząsteczek w danym ośrodku, ma szczególne znaczenie podczas procesu łączenia włókien światłowodowych techniką spajania łukiem elektrycznym. Wysoka temperatura zgrzewania powoduje, że domieszki rdzenia dyfundują do obszarów wolnych od domieszek lub miejsc o mniejszej ich koncentracji. Wartość temperatury wpływa na szybkość zachodzenia tego zjawiska.

Istotną jest również obecność domieszek w płaszczyźnie światłowodu. Domieszkowanie tego ośrodka, w celu obniżenia wartości współczynnika załamania, powoduje

szybsze zachodzenie procesu dyfuzji. Podczas spawania dwóch różnych pod względem domieszkowania włókien światłowodowych, należy mieć na uwadze, że różnica w szybkości dyfuzji domieszek rdzenia w jednym i drugim włóknie, wywoła zmianę współczynników załamania tych ośrodków (zmianę koncentracji domieszek), co może spowodować zwiększenie tłumienia spoiny [7,19,20].

Wartość strat spoiny (tłumienia), wynikających z niedopasowania pól modowych światłowodów, opisuje zależność [7]:

$$(1) \quad A_{NPM} = 20 \cdot \log \frac{W_1^2 + W_2^2}{2 \cdot W_1 \cdot W_2} \text{ [dB]}$$

gdzie: \$W_1, W_2\$ – promienie pól modowych łączonych włókien światłowodowych w miejscu ich styku [μm].

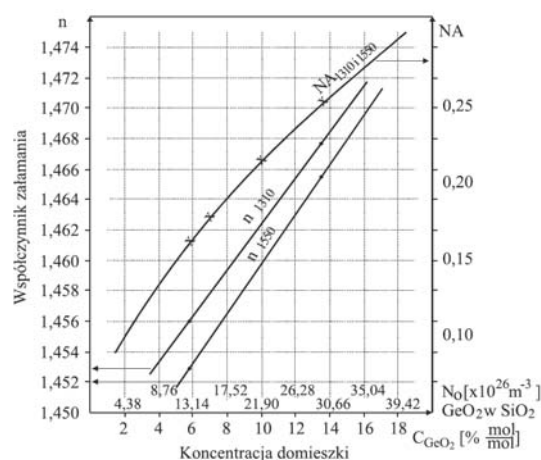
Teoretycznie, na podstawie wzoru (1), jeżeli łączone światłowody charakteryzują się identycznymi promieniami pól modowych, wówczas nie powinno wystąpić tłumienie w miejscu ich spawu. W rzeczywistości tak nie jest, ponieważ na tłumienie wpływa również apertura numeryczna obu włókien światłowodowych oraz koncentracja domieszki w płaszczyźnie i rdzeniu [7,19,20].

Kąt akceptacji odpowiada krytycznej wartości kąta padania promienia świetlnego na płaszczyznę \$\theta_0\$, aby możliwe było uzyskanie całkowitego wewnętrznego odbicia w rdzeniu światłowodu. Wyznaczając funkcję sinus, której argumentem jest kąt akceptacji, określa się aperturę numeryczną \$NA\$ światłowodu [6]:

$$(2) \quad NA = \sin \theta_0 = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

gdzie: \$n_1\$ – współczynnik załamania w rdzeniu światłowodu, \$n_2\$ – współczynnik załamania w płaszczyźnie światłowodu.

W celu określenia zależności współczynnika załamania \$n\$ i apertury numerycznej \$NA\$ od koncentracji domieszki \$\text{GeO}_2\$ w szkłe typu \$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\$, użytym do produkcji rdzenia światłowodu, skorzystano z danych i zależności zawartych w pracach [7,12,13,14]. Dla niedomieszkowanej (czystej) krzemionki \$\text{SiO}_2\$ przyjęto \$n = 1,4468\$ dla tzw. II okna optycznego i \$n = 1,4440\$ dla tzw. III okna optycznego. Obliczono, że 1% mol/mol \$\text{GeO}_2\$ w \$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\$ odpowiada koncentracji domieszki \$\text{GeO}_2\$ równej \$N_0 = 2,19 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}\$, a 10% mol/mol \$\text{GeO}_2\$ w \$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\$ odpowiada koncentracji domieszki \$\text{GeO}_2\$ równej \$N_0 = 2,19 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}\$. Wartość apertury numerycznej \$NA\$ liczono na podstawie wzoru (2). Obliczenia przeprowadzono w aplikacji MathCAD.



Rys. 4. Zależność współczynnika załamania (\$n\$) i apertury numerycznej światłowodu (\$NA\$) od koncentracji domieszki \$\text{GeO}_2\$ w \$\text{SiO}_2\text{-GeO}_2\$ [wyniki własne]

Uzyskane charakterystyki (rys. 4.) pozwalają określić koncentrację domieszki GeO₂ w łączonych światłowodach, których rdzenie zbudowane ze szkła typu SiO₂-GeO₂ znacząco różnią się parametrami.

W celu wyznaczenia strat powstałych wywołanych termicznie rozdyfundowaną domieszką – TRD, należy skorzystać z zależności:

$$(3) \quad A = A_{NPM} + A_{TRD} \text{ [dB]}$$

gdzie: A_{TRD} – tłumienie obszaru termicznie rozdyfundowanej domieszki – TRD [dB], które można określić korzystając ze wzorów [7]:

$$(4) \quad A_{TRD} = 10 \cdot \log(T_A \cdot T_{B1} \cdot T_{B2} \cdot T_C) \text{ [dB]}$$

$$(5) \quad T_A = 1 + \left[\frac{1}{2} \cdot (\gamma_{\max 1} - 1) \cdot \frac{\pi \cdot n_{r1} \cdot W_1^2}{\lambda \cdot L} \right]^2$$

$$(6) \quad T_{B1} = 1 + \left[\gamma_{\max 1} \cdot (\gamma_{\max 1} - 1) \cdot \frac{\pi \cdot n_{r1} \cdot W_1^2}{\lambda \cdot L} \right]^2$$

$$(7) \quad T_{B2} = 1 + \left[\gamma_{\max 2} \cdot (\gamma_{\max 2} - 1) \cdot \frac{\pi \cdot n_{r2} \cdot W_2^2}{\lambda \cdot L} \right]^2$$

$$(8) \quad T_C = 1 + \left[\frac{1}{2} \cdot (\gamma_{\max 2} - 1) \cdot \frac{\pi \cdot n_{r2} \cdot W_2^2}{\lambda \cdot L} \right]^2$$

gdzie: $\gamma_{\max 1}$ – stosunek promienia rdzenia światłowodu pierwszego po dyfuzji do promienia rdzenia światłowodu pierwszego przed dyfuzją, $\gamma_{\max 2}$ – stosunek promienia rdzenia światłowodu drugiego po dyfuzji do promienia rdzenia światłowodu drugiego przed dyfuzją, n_{r1} – współczynnik załamania w rdzeniu światłowodu pierwszego, n_{r2} – współczynnik załamania w rdzeniu światłowodu drugiego, λ – długość fali świetlnej (tzw. okno optyczne) [μm], L – połowa długości obszaru termicznie rozdyfundowanej domieszki [μm].

Korzystając z parametrów jednomodowych światłowodów nieodpornych i odpornych na zginanie zamieszczonych w tabeli 1 oraz wzorów (1) i (4) ÷ (8), dla tzw. II i III okna optycznego, różnych wartości połowy długości obszaru termicznie rozdyfundowanej domieszki – TRD i stosunku promienia rdzenia światłowodu po dyfuzji do promienia rdzenia światłowodu przed dyfuzją, w aplikacji MathCAD obliczono teoretyczne wartości tłumienia ich termicznych połączeń. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabelach 2 ÷ 4.

Analizując uzyskane wyniki teoretycznej wartości tłumienia połączeń rozpatrywanych światłowodów jednomodowych można sformułować następujące wnioski:

- wraz ze wzrostem stosunku promienia rdzenia światłowodu po dyfuzji do promienia rdzenia światłowodu przed dyfuzją γ rośnie wartość tłumienia spoiny rośnie. Oznacza to, że podczas przeprowadzania procesu termicznego łączenia światłowodów należy w taki sposób dobierać ustawienia spawarki światłowodowej, aby stosunek ten był bliski jedności,
- wzrost połowy długości obszaru termicznie rozdyfundowanej domieszki L powoduje zmniejszenie tłumienia spoiny. Oznacza to, że podczas przeprowadzania procesu termicznego łączenia światłowodów należy w taki sposób dobierać ustawienia spawarki światłowodowej, aby obszar przejściowy miał długość co najmniej 600 μm, wtedy wartość tłumienia spoiny będzie zawierała się w przedziale dopuszczalnego tłumienia tzn. od 0,05 dB do 0,1 dB [3],
- jednomodowe światłowody odporne na zginanie, można łączyć z jednomodowym światłowodem nieodpornym na zginanie G.652. Wartość tłumienia takiego połączenia

zawiera się w przedziale dopuszczalnego tłumienia tzn. od 0,05 dB do 0,1 dB [3],

- tłumienie spoin jednomodowych światłowodów odpornych na zginanie z jednomodowymi światłowodami nieodpornymi na zginanie G.653 i G.655, wykracza poza przedział dopuszczalnego tłumienia. Jest to spowodowane znacząco różniącymi się promieniami pól modowych oraz wartościami współczynników załamania w rdzeniu.

Tabela 1. Parametry jednomodowych światłowodów nieodpornych i odpornych na zginanie [4, 10, 12]

Oznaczenie światłowodu jednomodowego	Profil współczynnika załamania w rdzeniu światłowodu	Stężenie molowe domieszki GeO ₂ w rdzeniu światłowodu [M%]	Współczynnik załamania w rdzeniu n_r		Promień pola modu W [μm]
			1,31 μm	1,55 μm	
G.652	skokowy	4,582	1,4538	1,4515	4,15
G.653	trójkątny	9,344	1,4613	1,4590	3,00
G.655	korony	7,075	1,4577	1,4554	3,00
G.657A1	skokowy ze zmniejszoną średnicą pola modu	3,617	1,4523	1,4500	3,65
G.657B2	skokowy z depresyjnym płaszczem	2,970	1,4513	1,4490	4,00

Tabela 2. Teoretyczna wartość tłumienia termicznych połączeń światłowodów jednomodowych dla $\gamma_{\max} = 1,2$ [wyniki własne]

Łączone światłowody (1 i 2)	Tłumienie spoiny A, dB							
	L = 100 μm		L = 200 μm		L = 300 μm		L = 400 μm	
	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm
G.652 i G.652	0,210	0,150	0,053	0,038	0,023	0,017	0,013	0,009
G.652 i G.653	0,584	0,545	0,483	0,474	0,464	0,460	0,458	0,456
G.652 i G.655	0,583	0,545	0,483	0,473	0,464	0,460	0,458	0,455
G.652 i G.657A1	0,239	0,191	0,114	0,101	0,009	0,085	0,082	0,079
G.652 i G.657B2	0,201	0,145	0,055	0,041	0,028	0,021	0,018	0,015
G.653 i G.653	0,058	0,042	0,015	0,010	0,006	0,005	0,004	0,003
G.653 i G.655	0,058	0,041	0,015	0,010	0,006	0,005	0,004	0,003
G.653 i G.657A1	0,258	0,232	0,189	0,182	0,176	0,173	0,172	0,170
G.653 i G.657B2	0,474	0,440	0,385	0,376	0,368	0,364	0,362	0,360
G.655 i G.657A1	0,258	0,231	0,189	0,182	0,176	0,173	0,172	0,170
G.655 i G.657B2	0,474	0,440	0,385	0,376	0,368	0,364	0,362	0,360
G.657A1 i G.657B2	0,189	0,146	0,075	0,064	0,053	0,049	0,046	0,043

Tabela 3. Teoretyczna wartość tłumienia termicznych połączeń światłowodów jednomodowych dla $\gamma_{\max} = 1,6$ [wyniki własne]

Łączone światłowody (1 i 2)	Tłumienie spoiny A, dB							
	L = 100 μm		L = 200 μm		L = 300 μm		L = 400 μm	
	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm
G.652 i G.652	2,769	2,043	0,763	0,549	0,346	0,248	0,196	0,140
G.652 i G.653	2,254	1,773	0,939	0,801	0,671	0,608	0,575	0,539
G.652 i G.655	2,252	1,772	0,939	0,801	0,671	0,608	0,575	0,539
G.652 i G.657A1	2,325	1,726	0,684	0,512	0,349	0,270	0,228	0,183
G.652 i G.657B2	2,602	1,917	0,717	0,517	0,328	0,236	0,188	0,136
G.653 i G.653	0,839	0,604	0,216	0,154	0,097	0,069	0,054	0,039
G.653 i G.655	0,837	0,603	0,216	0,154	0,096	0,069	0,054	0,039
G.653 i G.657A1	1,455	1,102	0,505	0,409	0,318	0,275	0,252	0,227
G.653 i G.657B2	1,985	1,547	0,793	0,669	0,552	0,496	0,466	0,434
G.655 i G.657A1	1,453	1,100	0,505	0,409	0,318	0,275	0,252	0,227
G.655 i G.657B2	1,984	1,545	0,792	0,668	0,554	0,496	0,466	0,434
G.657A1 i G.657B2	2,115	1,560	0,597	0,439	0,289	0,217	0,179	0,139

Tabela 4. Teoretyczna wartość tłumienia termicznych połączeń światłowodów jednomodowych dla $\gamma_{\max} = 2,0$ [wyniki własne]

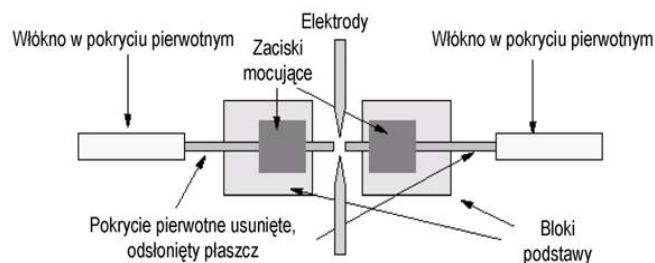
Łączone światłowody (1 i 2)	Tłumienie spoiny A, dB							
	L = 100 μm		L = 200 μm		L = 300 μm		L = 400 μm	
	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm	1,31 μm	1,55 μm
G.652 i G.652	8,505	6,677	2,868	2,123	1,378	1,000	0,798	0,575
G.652 i G.653	6,264	4,948	2,322	1,827	1,338	1,093	0,962	0,818
G.652 i G.655	6,257	4,942	2,320	1,826	1,337	1,092	0,962	0,818
G.652 i G.657A1	7,250	5,650	2,410	1,794	1,183	0,876	0,713	0,533
G.652 i G.657B2	8,086	6,327	2,696	1,993	1,293	0,939	0,750	0,542
G.653 i G.653	3,123	2,319	0,878	0,633	0,400	0,286	0,227	0,162
G.653 i G.655	3,116	2,314	0,875	0,631	0,399	0,286	0,226	0,162
G.653 i G.657A1	4,653	3,566	1,510	1,143	0,789	0,614	0,522	0,421
G.653 i G.657B2	5,744	4,497	2,050	1,597	1,152	0,931	0,813	0,684
G.655 i G.657A1	4,646	3,561	1,508	1,142	0,788	0,613	0,521	0,420
G.655 i G.657B2	5,737	4,491	2,048	1,595	1,151	0,930	0,813	0,684
G.657A1 i G.657B2	6,785	5,259	2,196	1,623	1,056	0,774	0,623	0,458

Wyniki eksperymentów oraz ich analiza

Przeprowadzony eksperyment polegał na wykonaniu spawów termicznych jednomodowych światłowodów odpornych na zginanie G.657A1 i G.657B2, z jednomodowymi światłowodami nieodpornymi na zginanie G.652, G.653 i G.655, przy użyciu spawarki światłowodowej Fujikura 60S. Jest to spawarka dwuelektrodowa, posiadająca funkcję umożliwiającą spawanie włókien światłowodowych o nierównych polach modu oraz autokalibrację łuku w czasie rzeczywistym. Dzięki temu minimalizowane jest tłumienie wykonanej spoiny.

Termiczne łączenie światłowodów poprzez ich zgrzewanie łukiem elektrycznym, przy użyciu spawarki światłowodowej, jest obecnie techniką zapewniającą najmniejsze, dla światłowodów jednomodowych, tłumienie połączenia (< 0,08 dB) oraz małą wartość strat odbiciowych – reflektancji (> 60 dB) [7,24].

Temperatura mięknienia krzemionki, na bazie której wykonany jest rdzeń i płaszcz światłowodu jednomodowego, to około 550 °C [5]. Wobec powyższego, zasada spajania (spawania) łukiem elektrycznym polega na łączeniu dwóch włókien światłowodowych przy użyciu wysokiej temperatury (około 2000 °C) [18,19,20], gdzie źródłem ciepła jest wyładowanie łukowe, które powstaje pomiędzy dwiema elektrodami (rys. 5.), w które wyposażona jest zgrzewarka spajająca łukiem elektrycznym (spawarka światłowodowa). Powoduje on zgrzanie obu włókien światłowodowych, co prowadzi do ich trwałego połączenia optycznego.



Rys. 5. Schemat spawania (spawania) włókien światłowodowych łukiem elektrycznym [16]

Proces spawania łukiem elektrycznym składa się z trzech głównych etapów: podgrzewania wstępnego, spawania właściwego i wygrzewania końcowego, dla każdego z nich definiowana jest wartość prądu i czas trwania łuku.

Sumaryczny czas spajania wynosi od 0,5 s do 3 s i nie powinien być dłuższy ze względu na indukowane naprężenia termiczne oraz możliwe przegrzanie struktury materiału [18,19,20]. Łuk elektryczny pozwala nie tylko na wykonanie spoiny, ale również na wstępne wygrzanie włókien i końcowe wygrzanie połączenia w celu eliminacji naprężeń.

Następnie, przy użyciu reflektometru optycznego Yokogawa AQ7280, przeprowadzono dwukierunkowe pomiary tłumienia wykonanych spawów łukiem elektrycznym. Pomiary przeprowadzono w tzw. II i III oknie optycznym przy użyciu metody dwupunktowej (2PA bądź TPA) oraz metody czteropunktowej (LSA). Zgodnie z wytycznymi dotyczącymi przeprowadzania pomiarów reflektometrycznych, uzyskane wyniki uśredniono arytmetycznie [2,6,15,16,17,21,22,23], a uzyskane wartości przedstawiono w tabelach 5 i 6.

Tabela 5. Uśrednione wartości tłumienia spawów łukiem elektrycznym jednomodowych światłowodów odpornych na zginanie (G.657A1 i G.657B2) z jednomodowymi światłowodami nieodpornymi na zginanie (G.652, G.653 i G.655) dla tzw. II okna optycznego [wyniki własne]

Typ jednomodowego światłowodu odpornego na zginanie	Wartość średnia tłumienia spoiny A_{sr} [dB]					
	G.652		G.653		G.655	
	2PA	LSA	2PA	LSA	2PA	LSA
G.657A1	0,036	0,039	0,220	0,192	0,341	0,821
G.657B2	0,081	0,085	0,237	0,233	0,139	0,857

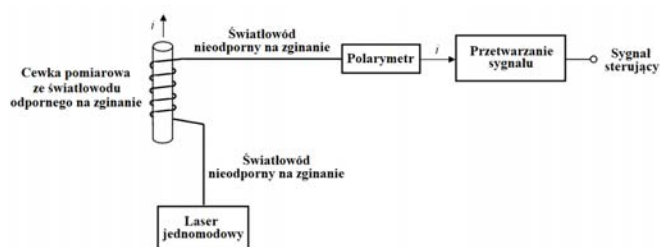
Tabela 6. Uśrednione wartości tłumienia spawów łukiem elektrycznym jednomodowych światłowodów odpornych na zginanie (G.657A1 i G.657B2) z jednomodowymi światłowodami nieodpornymi na zginanie (G.652, G.653 i G.655) dla tzw. III okna optycznego [wyniki własne]

Typ jednomodowego światłowodu odpornego na zginanie	Wartość średnia tłumienia spoiny A_{sr} [dB]					
	G.652		G.653		G.655	
	2PA	LSA	2PA	LSA	2PA	LSA
G.657A1	0,025	0,074	0,062	0,117	0,117	0,563
G.657B2	0,067	0,075	0,096	0,145	0,102	0,521

Analiza uzyskanych wyników polegała na sprawdzeniu, czy wartość średnia tłumienia spawu łukiem elektrycznym zawiera się w przedziale dopuszczalnego tłumienia tzn. od 0,05 dB do 0,1 dB [3]. Podczas analizy za miarodajne uznano wyniki uzyskane metodą dwupunktową. Wynika to z faktu, że metoda czteropunktowa jest mniej dokładna podczas analizy zdarzeń występujących na krótkich odcinkach światłowodu [16,21,22,24]. Można sformułować następujące wnioski:

- tłumienie spoin jednomodowych światłowodów odpornych na zginanie G.657A1 i G.657B2 oraz jednomodowego światłowodu nieodpornego na zginanie G.652 mieści się w normie. Wynika to z faktu, że włókna te mają zbliżone średnice pól modowych, są więc ze sobą kompatybilne,
- tłumienie spoin jednomodowych światłowodów odpornych na zginanie G.657A1 i G.657B2 oraz jednomodowego światłowodu nieodpornego na zginanie G.653 mieści się w normie jedynie dla tzw. III okna optycznego. Występująca niezgodność w obrębie tzw. II okna optycznego wynika z faktu, że światłowody te mają znacząco różniące się średnice pól modowych oraz współczynniki załamania w rdzeniu,
- tłumienie spoin jednomodowych światłowodów odpornych na zginanie G.657A1 i G.657B2 oraz jednomodowego światłowodu nieodpornego na zginanie G.655 nie mieści się w normie dla obydwu okien optycznych. Wynika to z faktu, że światłowody te mają znacząco różniące się średnice pól modowych oraz współczynniki załamania w rdzeniu. Kolejnym czynnikiem wywołującym wzrost tłumienia jest „skomplikowany” kształt

profilu współczynnika załamania światłowodu G.655. Oznacza to, że światłowody te nie są ze sobą kompatybilne.



Rys. 6. Schemat zdalnego systemu pomiarowego lub kontrolno-zabezpieczeniowego linii elektroenergetycznych z polarymetrycznym czujnikiem natężenia prądu, którego cewka pomiarowa wykonana jest z jednomodowego światłowodu odpornego na zginanie [wyniki własne]

Podsumowanie

Uzyskane wyniki fizycznych pomiarów potwierdziły analizę teoretyczną spawów, którą przeprowadzono na modelu matematycznym przy użyciu aplikacji MathCAD.

W przypadku spoin światłowodu G.652 ze światłowodami G.657A1 oraz G.657B2 wyniki uzyskane w drodze symulacji komputerowej pokryły się z wynikami pomiarów wykonanych spawów łukiem elektrycznym. Rozbieżności w obrębie spoin światłowodu G.653 ze światłowodami G.657A1 oraz G.657B2, a także światłowodu G.655 ze światłowodami G.657A1 oraz G.657B2 wynikają z faktu, że użyta spawarka światłowodowa posiada funkcję umożliwiającą spawanie włókien o nierównych polach modu oraz autokalibrację łuku w czasie rzeczywistym, dzięki czemu minimalizowane jest tłumienie spoiny.

Ostatecznie można stwierdzić, że w światłowodowych systemach pomiarowych oraz kontrolno-zabezpieczeniowych, cewka czujnika Faradaya (czujnika polarymetrycznego) może być wykonywana z jednomodowego światłowodu odpornego na zginanie G.657A1 lub G.657B2, natomiast światłowodem doprowadzającym sygnał optyczny do czujnika i układu odbiorczego może być jednomodowy światłowod nieodporny na zginanie G.652 lub G.653. System, w którym wykorzystano światłowod G.652 może pracować w tzw. II lub III oknie optycznym. Jeżeli użyty zostanie światłowod G.653, wówczas system może pracować jedynie w tzw. III oknie optycznym. Wynika to z analizy tłumienia spoin tychże światłowodów.

Schemat rozpatrywanego systemu pomiarowego lub kontrolno-zabezpieczeniowego linii elektroenergetycznych z polarymetrycznym czujnikiem natężenia prądu, którego cewka pomiarowa wykonana jest z jednomodowego światłowodu odpornego na zginanie, przedstawiono w rysunku 6.

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

LITERATURA

- [1] Marciniak M., Ratuszek M., Łączność Światłowodowa, WKŁ, Warszawa (1998)
- [2] Perlicki K., Pomiar w optycznych systemach telekomunikacyjnych, WKŁ, Warszawa (2002)
- [3] Siudak J., Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej, WKŁ, Warszawa (1999)
- [4] Torbus S. A., Metrologiczne zastosowania światłowodów jednomodowych. Działalność naukowa i badawcza Instytutu Chemii Politechniki Warszawskiej, Instytut Chemii WBMiP PW, Płock (2016)
- [5] Szwedowski A., Romaniuk R. S., Szkło optyczne i fotoniczne. Właściwości techniczne, WNT, Warszawa (2009)
- [6] Zalewski J., Telekomunikacja światłowodowa – materiały szkoleniowe dla uczestników kursów organizowanych przez WTIE ATR Bydgoszcz, ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz (1997)
- [7] Ratuszek M., Termiczne połączenia jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych, Wydawnictwo UTP w Bydgoszczy, Bydgoszcz (2008)
- [8] Torbus S. A., Zastosowanie światłowodów telekomunikacyjnych G.652, G.653 i G.655 w polarymetrycznych czujnikach natężenia prądu, *Pomiary Automatyka Kontrola*, Maj (2011)
- [9] Torbus S. A., Jordan A., Analiza wpływu rozmieszczenia przewodów linii elektroenergetycznej wysokiego napięcia 110 kV na dokładność pomiaru natężenia prądu za pomocą czujnika polarymetrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, Czerwiec (2011)
- [10] Torbus S. A., Ratuszek M., Analiza dokładności pomiaru natężenia prądu za pomocą czujnika interferometrycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, Grudzień (2010)
- [11] Torbus S. A., Kłosowski Z., Cieślak S., Badania symulacyjne dokładności klasycznych i polarymetrycznych przekładników prądowych przeznaczonych do pomiaru natężenia prądu w przewodach linii elektroenergetycznej 110 kV, *Przegląd Elektrotechniczny*, Październik (2012)
- [12] Torbus S. A., Fajfer M., Ratuszek M. J., Projektowanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 dla celów metrologicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, Sierpień (2013)
- [13] Torbus S. A., Ratuszek M., Zastosowanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych odpornych na zginanie G.657 do realizacji cewki pomiarowej polarymetrycznego czujnika natężenia prądu, *Przegląd Elektrotechniczny*, Kwiecień (2012)
- [14] Torbus S. A., Dutkiewicz P., Projektowanie jednomodowych światłowodów telekomunikacyjnych dla czujników wykorzystujących magnetoopcyjne zjawisko Faradaya, *Przegląd Elektrotechniczny*, Luty (2015)
- [15] Romaniuk R. S., Miernictwo światłowodowe, KSO, Zakopane (2001)
- [16] Torbus S.A., Pomiar parametrów transmisyjnych w sieciach optotelekomunikacyjnych, *Praca magisterska pod kierunkiem dra inż. M. J. Ratuszka, ATR WTIE, Bydgoszcz* (2006)
- [17] Dylewicz R., Stopa J., Frodyma R., Patela S., Problem wiarygodności pomiarów reflektometrycznych tras i sieci światłowodowych, *KST, Bydgoszcz* (2003)
- [18] Zakrzewski Z., Techniki łączenia światłowodów, *ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz* (1998)
- [19] Luo J., Modeling Dissimilar Optical Fiber Splices with Substantial Diffusion, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25 (2007)
- [20] Zheng W., Estimation for Fusion Splices of Singlemode Fibers, *Fiber Optic Components and Reliability*, Vol. 158 (1991)
- [21] Petykiewicz J., Pura B., Tadeusiak A., Badania strukturalne spoin światłowodowych, *IV Konferencja Naukowa – Technologia i Zastosowanie Światłowodów*, Krasnobród (1996)
- [22] Majewski J., Ratuszek M., Zakrzewski Z., Tłumienie spawów światłowodów o różnych średnicach rdzenia i aperturach numerycznych, *IV Konferencja Naukowa – Technologia i Zastosowanie Światłowodów*, Krasnobród (1996)
- [23] Meunier J. P., Hosain S. I., An Accurate Splice Loss Analysis for Single-Mode Graded-Index Fibers with Mismatched Parameters, *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10 (1992)
- [24] Chen J. H., Sun Y. T., Wang L. A., Reducing Splicing Loss Between a Silicon-Cored Optical Fiber and a Silica Optical Fiber, *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 28 (2016)