

Antoni RÓŻOWICZ¹

WŁAŚCIWOŚCI SYSTEMÓW OŚWIETLENIOWYCH NA ŚWIATŁOWODACH

Propagacja światła wzdłuż optycznego światłowodu zależy od wielu czynników, wśród których dość duże znaczenie ma; kąt wejścia wiązki światła do rdzenia światłowodu, czystość materiału rdzenia i płaszczu oraz współczynnik wewnętrznego odbicia. Światłowody używane w technice oświetleniowej najczęściej są wykonane ze szkła kwarcowego lub PMMA. Sprawność i efektywność tych systemów jako całości zależna jest od: konstrukcji generatora, zastosowanego źródła światła, zespołu źródło światła-kolimator, rodzaju materiału użytego na światłowód, długości światłowodu. O wyborze tego systemu do celów oświetleniowych powinny decydować wymogi środowiskowe oraz estetyczne.

CHARACTERISTICS OF LIGHTING SYSTEMS REALIZED USING OPTICAL FIBRES

Lighting propagation in optical fibres depends on many factors. Main factors are: falling angle of light stream into fibre core, purity of core and cover material, coefficient of internal reflection. Optical fibres used in lighting technology are made mostly from quartz glass or PMMA. Those systems efficiency depends on: construction of generator, type of used light source and collimator, length of fibre. The environmental and esthetic constraints should be considered when choosing optical fibre systems.

1. WPROWADZENIE

Światło jest niezbędne do życia, wpływa także na jego jakość. Codziennie po zmroku włączamy źródła sztucznego oświetlenia, które umożliwiają nam przedłużenie normalnego funkcjonowania. Najbardziej popularnym źródłem światła używanym do oświetlenia gospodarstw domowych jest żarówka, biur i hal produkcyjnych świetlówka, dróg i placów lampa rtęciowa. Jednakże są one coraz częściej wypierane przez bardziej nowoczesne źródła i systemy światła. Coraz częściej dla zapewnienia właściwego kształtowania oświetlenia we wnętrzach jak i obiektów zewnętrznie iluminowanych potrzebne są źródła światła o takich własnościach, które pozwolą na optymalne wykorzystanie istniejących systemów oświetleniowych jak i ukazanie zamierzonych cech iluminowanego obiektu. Do takich układów niewątpliwie należą świetlne systemy światłowodowe.

¹ dr hab. inż. Antoni Różowicz prof. PŚk – Politechnika Świętokrzyska, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Świetlnej, Aleja Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce

W skład świetlnego systemu światłowodowego (niekiedy nazywa się torem światłowodowym) rys.1 wchodzi: źródło światła (Z), element kolimujący tworzący wiązkę świetlną o małej rozwarości (K), zestaw filtrów (F), pojedyncze włókno lub wiązka włókien światłowodowych (Ś) oraz elementy kształtujące bryłę świetlną wychodzącą ze światłowodu (O). W praktyce występuje w torze światłowodowym trzy elementy:

- generator światła (G) który samym sobą przedstawia;
 - - źródło światła (Z),
 - - kolimator (K),
 - - filtry (F),
- kable światłowodowe (Ś),
- końcówki soczewkowe (O).



Rys.1. Schemat układu toru światłowodowego

2. PODSTAWY FIZYCZNE PRZEWODZENIA ŚWIATŁA WE WŁÓKNIE ŚWIATŁOWODOWYM

Strumień światła przechodzący z ośrodka optycznie gęstszego (o większym współczynniku załamania) do ośrodka optycznie rzadszego na granicy ośrodków ulega częściowemu odbiciu i załamaniu tzn część strumienia odbija się od powierzchni granicznej pod kątem równym kątowi padania strumienia na tą powierzchnię, natomiast część strumienia ulega załamaniu w drugim ośrodku, przy czym kąt załamania Θ_2 jest większy od kąta padania Θ_1 .

Zgodnie z prawem Snelliusa:

$$\frac{\sin \Theta_1}{n_2} = \frac{\sin \Theta_2}{n_1} \quad (1)$$

gdzie:

- n_1 –współczynnik załamania ośrodka pierwszego,
- n_2 – współczynnik załamania ośrodka drugiego.

Współczynnik załamania określa się zależnością:

$$n_1 = \frac{c_0}{v_1}, \quad n_2 = \frac{c_0}{v_2} \quad (2)$$

gdzie:

- c_0 – prędkość światła w próżni
- v_1 – prędkość światła w ośrodku o współczynniku załamania n_1
- v_2 – prędkość światła w ośrodku o współczynniku załamania n_2

Przy wzroście kąta padania $\Theta_1 = \Theta_{kr}$ kąt załamania wzrasta do $\Theta_2 = 90^\circ$, tak że promień załamany rozprzestrzenia się wzdłuż powierzchni granicznej, czyli:

$$\sin \Theta_{kr} = \frac{n_2}{n_1} \quad (3)$$

a więc:

$$\Theta_{kr} = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (4)$$

Przekroczenie przez promień padający kąta Θ_{kr} powoduje, że światło odbija się od granicy ośrodków zgodnie z zasadą: kąt padania i odbicia są równe i leżą w płaszczyźnie prostopadłej do elementu odbijającej powierzchni. Zjawisko to nazywane jest całkowitym wewnętrznym odbiciem. Kąt Θ_{kr} poza którym występuje całkowite wewnętrzne odbicie jest nazywany kątem krytycznym.

Tak długo jak promień padający na granice między dwoma ośrodkami o różnej gęstości (różnych współczynnikach załamania) przy kącie większym niż kąt krytyczny Θ_{kr} , tak długo będzie występowało odbijanie promienia z powrotem do tego samego ośrodka, a graniczna powierzchnia (między ośrodkami) odbijająca zachowuje się jak doskonałe zwierciadło. Tak, taki promień będzie łapany w pułapkę wewnątrz włókna światłowodowego, przechodząc wielokrotne wewnętrzne odbicia, by wynurzyć się na końcu włókna światłowodowego.

W światłowodach o skokowej zmianie współczynnika załamania między rdzeniem a płaszczem zauważyć można, że analogiczna sytuacja zachodzi pomiędzy płaszczem a ośrodkiem go otaczającym jakim jest powietrze.

Ponieważ od strony płaszczka na granicy płaszcz-rdzeń nie może zachodzić całkowite wewnętrzne odbicie, część promieni rozchodzących się w płaszczu powtórnie przechodzi do rdzenia. Tam padając na przeciwległą granicę pod kątem mniejszym od krytycznego, przechodzi powtórnie do obszaru płaszczka. Tak rozchodzące się promienie świetlne nie są wypromieniowywane na zewnątrz włókna, lecz prowadzone w płaszczu. Promienie prowadzone w płaszczu są bardziej tłumione niż promienie prowadzone w rdzeniu. Przyczyną jest pochłanianie energii wiązki światła przez okrywający płaszcz oraz mikrozgięcia włókna. Istnienie prowadzenia płaszczowego może zachodzić jedynie na początku światłowodów połączonego ze źródłem.

3. PARAMETRY ŚWIATŁOWODÓW STOSOWANYCH W SYSTEMACH OŚWIETLENIOWYCH

Światłowodem może być każde urządzenie optyczne w obrębie którego światło po liniach łamanych, będących wynikiem kolejnych odbić przemieszcza się od wejścia do wyjścia. Ponieważ proces odbicia ma skończoną sprawność określoną wartością współczynnika odbicia, dlatego jakościowo dobry światłowód (pojedyncze włókno światłowodowe) powinno charakteryzować się wartością współczynnika odbicia ρ możliwie zbliżoną do jedności. Wykorzystywany w technice oświetleniowej jako element prowadzący (światłowód) może mieć rdzeń wykonany ze szkła kwarcowego SiO_2 lub z PMMA.

Obecnie światłowody mogą być wykonywane jako:

- całkowicie z domieszkowego szkła, przy czym materiał rdzenia ma współczynnik załamania nieco większy niż płaszcz,
- ze szkła kwarcowego i z płaszczem polimerowym np. z żywicy silikonowej,
- całkowicie wykonane z polimerów.

Różnica współczynników załamania jest najmniejsza dla włókien całkowicie szklanych, większa dla włókien z płaszczem polimerowym około dwukrotnie i największa dla włókien całkowicie polimerowych. Jak wiadomo [4] apertura numeryczna światłowodów rośnie wraz ze wzrostem różnicy współczynników załamania rdzenia i płaszczu (n_1 , n_2). Małe wartości apertury numerycznej oznaczają jednocześnie niewielką sprawność sprzężenia energetycznego źródło-swiatłowód.

Wyżej przedstawione typy światłowodów cechują się następującymi właściwościami:

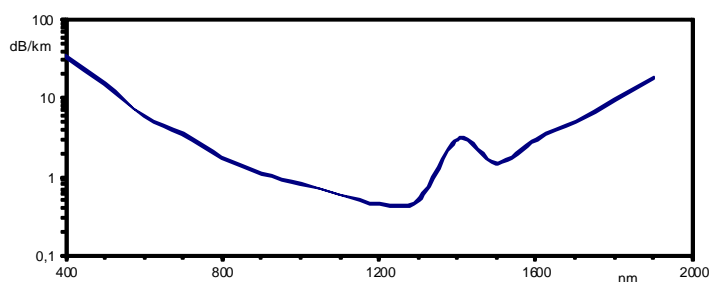
- światłowody wykonane całkowicie ze szkła, cechują się małą aperturą numeryczną, niewielką stratnością, średnice rdzenia wynoszą 50, 100 lub 200 μm , mała średnica włókien sprawia kłopoty przy łączeniu,
- światłowody z płaszczem polimerowym cechują się większą aperturą numeryczną, średnice rdzenia wynoszą 200 μm i więcej,
- światłowody całkowicie polimerowe cechują się dużą aperturą numeryczną, dużą stratnością, średnice rdzenia wynoszą 1mm lub 2mm.

Światłowody z czystego szkła kwarcowego w postaci niekryształicznej cechuje się współczynnikiem załamania n wynoszącym od 1,45 do 1,51 w zakresie pasma widzialnego (im dłuższa fala tym mniejszy współczynnik załamania). Znaczący wpływ na wartość współczynnika załamania ma zawartość domieszkowania innych pierwiastków. Włókna wykonane z SiO_2 (płaszcz szklany lub polimerowy) mają niezwykle małą tłumienność, wynoszącą dla promieniowania pasma widzialnego od 1.2dB/km do 38dB/km (znacznie mniejsze wartości tłumienności posiada szkło kwarcowe w zakresie podczerwieni bliskiej). Na rys.2 przedstawiono wykres tłumienności światłowodu wykonanego ze szkła.

Straty w materiale światłowodu wynikają z:

- absorpcji promieniowania, tzn. z istnienia obcych ciał w masie szklanej rdzenia światłowodu,
- rozproszenia promieniowania przechodzącego przez ośrodek.

Procentowo większą wartość stanowią straty absorpcyjne



Rys.2. Tłumienność światłowodu o bardzo małych stratach

Światłowody wykonane ze szkła kwarcowego pomimo, że cechują się bardzo dobrymi parametrami przewodzenia nie znajdują w świetlnych systemach światłowodowych zbyt dużego zastosowania ze względu na zbyt małą elastyczność przy większych średnicach, czyli światłowody tego rodzaju mogą być stosowane do przenoszenia bardzo małych mocy świetlnych.

W latach osiemdziesiątych po raz pierwszy wprowadzono na rynek oświetleniowy światłowody wykonane z PMMA (polimetakrylan metylu). Przezroczysta masa wyglądem przypominająca szkło, nierozpuszczalna w wodzie, rozpuszczalna m.in. w estrach, acetonie, dioksanie. PMMA jest materiałem, który dobrze prowadzi transmisję światła w pełnym paśmie promieniowania widzialnego. Produkowane światłowody z PMMA cechują się współczynnikiem załamania n wynoszącym od 1,4 do 1,49 w zakresie pasma widzialnego. Współczynnik tłumienia strumienia świetlnego światłowodów wykonanych z PMMA jest ponad 8 do 130 razy większy niż dla światłowodów wykonanych ze szkła kwarcowego. Wartość współczynnika tłumienia światłowodów wykonanych z PMMA jest różna dla różnych długości fali. Tak duża wartość tłumienności w sposób zasadniczy wpływa na opłacalną długość stosowanych światłowodów. W przypadku zastosowania światłowodów o mniejszej tłumienności wydłuża się znacznie opłacalną długość kabli światłowodowych. Jak wykazują dotychczasowe badania [1,4] sprawność wiązki światłowodu oświetleniowego mierzona całkowitym współczynnikiem przepuszczenia jest ściśle uzależniona od długości kabli w wiązce. Długość kabli liczona od głowicy do końcówki optycznej i nie powinna przekraczać kilkunastu metrów, by sprawność można uznać za dostatecznie dużą. Sprawność światłowodu definiuje się jako;

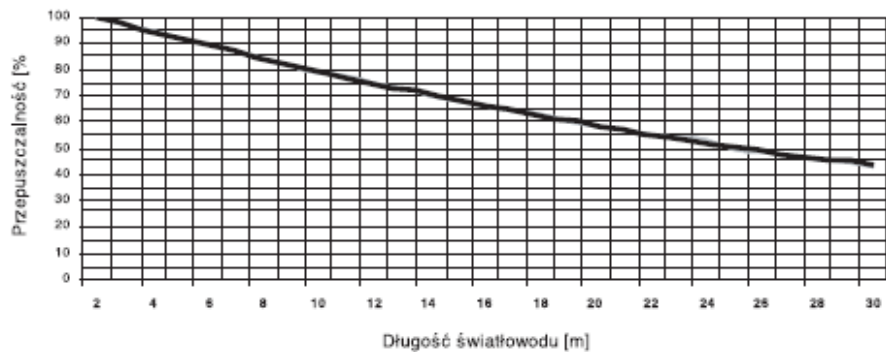
$$\eta = \frac{\Phi_{wej}}{\Phi_{wyj}} \quad (5)$$

gdzie:

Φ_{wej} – strumień świetlny na końcu światłowodu

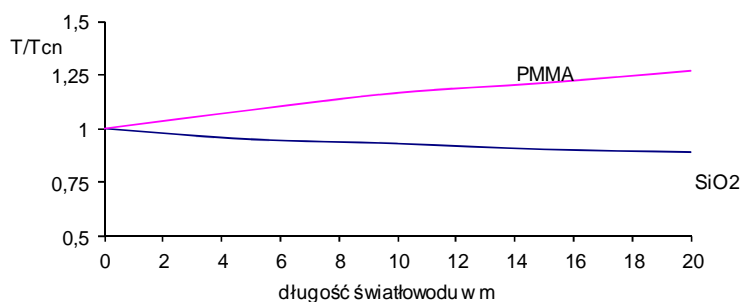
Φ_{wyj} - strumień świetlny wprowadzony do głowicy światłowodu

Na rys.3. przedstawiono zależność wpływu długości światłowodu na stratność strumienia świetlnego. Z danych (rys.3) wynika dość jednoznacznie, że każde 5 metrów kabli wiązki światłowodowej powoduje zmniejszenie przepuszczalności o około 10%. Stosowanie więc wiązki światłowodowej o długości kabli ponad 30m staje się niecelowe gdyż sprawność wyniesie nieco ponad 40%. Jak widać z przedstawionych danych (rys.3) bardzo istotny wpływ na efekt końcowy oświetlenia mają wiązki światłowodowe. Dlatego jak wykazano wyżej przy stosowaniu światłowodowego systemu oświetleniowego należy uwzględnić wiele czynników między innymi materiał włókna, moc przenoszona oraz stratność strumienia świetlnego w kablu światłowodowym (rys.3).

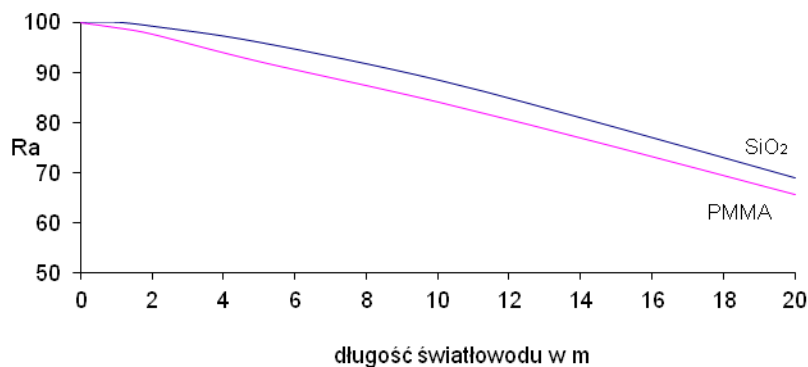


Rys.3. Przepuszczalność światłowodu PMMA w funkcji długości

Jak wykazują badania własne autora [4] przy projektowaniu systemu światłowodowego należy ponadto uwzględnić zmienność wskaźnika oddawania barw oraz zmienność temperatury barwowej wiązki światła wyprowadzanej ze światłowodu w funkcji zastosowanej długości wiązek światłowodowych. Zależność zmian tych parametrów w funkcji długości wiązek przedstawiono na rys. 4, rys. 5.



Rys.4. Temperatura barwy światła wychodzącego ze światłowodu w funkcji jego długości



Rys.5. Współczynnik oddawania barw w funkcji jego długości

Z przedstawionych danych wynika iż temperatura barwy światła (rys.4) wychodzącego z wiązki światłowodu o długości 20m zmienia się, i tak dla światłowodów wykonanych z PMMA zwiększa się o około 25% natomiast dla światłowodów wykonanych z SiO₂ zmniejsza się o około 20%. Natomiast współczynnik oddawania barw dość istotnie maleje w funkcji długości wiązki światłowodowej (rys.5). Parametry te należy mieć na uwadze przy projektowaniu oświetlenia systemami światłowodowymi.

Przeprowadzone przez autora badania transmisji promieniowania wykazały, że wiązka światła wychodząca ze światłowodu pozbawiona jest promieniowania w paśmie ultrafioletu i podczerwieni.

4. WPROWADZENIE STRUMIENIA ŚWIETLNEGO DO ŚWIATŁOWODU

Każde wygięcie światłowodu może powodować zakłócenia wartości kąta padania światła na kolejne elementy granicy ośrodków tak że część światła pada pod kątem mniejszym od granicznego i w efekcie może wypływać poza światłowód. Tak więc konstrukcja światłowodu pokazana na rys.4. (rdzeń walcowy o większym współczynniku załamania n_1 objęty ściśle warstwą materiału płaszczu o współczynniku $n_2 < n_1$) prowadzi światło, które wejdzie do rdzenia pod pewnym kątem.

Strumień światła pada na rdzeń z powietrza którego współczynnik załamania $n_0 = 1$. Uwzględniając prawo Snelliusa maksymalny kąt padania na płaszczyznę wejściową światłowodu wynosi:

$$\sin \Theta_{wej} = n_1 \sin(90^\circ - \Theta_{kr}) = n_1 \sqrt{1 - \frac{n_2^2}{n_1^2}} \quad (6)$$

Krytycznej wartości kąta padania na płaszcz Θ_{kr} odpowiada kąt akceptacji światłowodu Θ zawarty między osią światłowodu i promieniem krytycznym. Wartość funkcji sinusa tego kąta nazywa się aperturą numeryczną NA światłowodu i określa pośrednio maksymalną rozwartość wiązki świetlnej, która może być transportowana rdzeniem światłowodu.

$$NA = \sin \Theta_{\max} \quad (7)$$

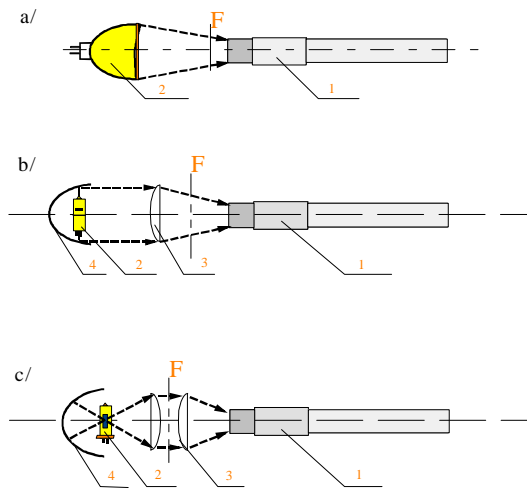
Przy danej kombinacji materiałów rdzenia i płaszczka światłowodu apertura liczbowa włókna wynosi:

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Kąt akceptacji wyznacza rozwartość stożka akceptacji o kącie 2Θ w przedziale którego światłowód przyjmuje promień świetlny. Jak wynika z przedstawionych wyżej zależności wartość apertury numerycznej światłowodu warunkuje efektywność sprzężenia światłowodu z generatorem źródła światła. Z różnicy wartości kątów rozwarcia stożka akceptacji światłowodu i wartości kąta rozwarcia promieniowania generatora źródła światła wynikają straty sprzężenia. Kąty rozwarcia układów świetlnych generatorów są dość zróżnicowane jak pokazano w dalszej części artykułu, dlatego straty sprzężenia są także zróżnicowane.

W zależności od zastosowanego źródła światła rozróżnia się trzy rozwiązania konstrukcyjne generatora rys.6

Jak widać na rys. 6 w każdym z rozwiązań generatora wypromieniowane światło ze źródła światła jest kierowane do światłowodu (głowicy światłowodu), bezpośrednio rys 6a, lub wiązka światła zostaje odbita od lustra i po przejściu i skupieniu przez zintegrowany układ soczewek wprowadzona do głowicy światłowodu rys.6b, 6c. Każde z powyższych rozwiązań układu generatora charakteryzuje się innym kątem Θ_{wyj} , a to oznacz także różne wartości strat strumienia na styku źródło światła głowica światłowodu.



Rys.6. Układy optyczno-świetlne generatorów, a/ układ z źródłem typu Masterline bez układu kolimacyjnego; b/ układ z źródłem typu halogen capsuleline i kolimatorem, c/ układ z źródłem typu metalohalgen i kolimatorem. Oznaczenia na rysunku: 1- kabel światłowodowy, 2- źródło światła, 3- kolimator, 4- lustro.

Przeprowadzone przez autora badania sprawności tych układów wykazały, że sprawność generatorów wynosi od 21% do 51%. Tak znaczące różnice w otrzymanych wartościach sprawności generatorów wynikają z, konstrukcji generatora (typu a, b lub c) oraz z zastosowanego źródła światła w danym typie.

5. WNIOSKI

Tam gdzie tradycyjne elektryczne źródła światła okazują się problemem – czyli tam gdzie mamy do czynienia z wodą, gazem, czułymi materiałami itd – system światłowodowy może być jedyną alternatywą.

Natomiast przy projektowaniu światłowodowego systemu oświetleniowego należy uwzględnić wiele czynników między innymi materiał włókna, moc przenoszoną, stratność strumienia świetlnego, wskaźnik oddawania barw, zmianę temperatury barwowej w funkcji długości światłowodów.

6. LITERATURA

- [1] Bobrowski Cz.: *Fizyka krótki kurs*, WNT, Warszawa 1993
- [2] *Nowe trendy w oświetleniu*, Philips Lighting 3222 635
- [3] *Fibre Optic Lighting Systems*, 9104 020 06715
- [4] Smoliński A.: *Światłowody i ich zastosowanie*, Ossolineum 1980
- [5] Różowicz A.: *Wieloaspektowość stosowania świetlnych systemów światłowodowych*. LUMEN'09.