

Ryszard MACELUCH

Lech ZNAMIROWSKI

Instytut Informatyki
Czasu Rzeczywistego
Politechniki Śląskiej

LINIOWE ŁĄCZE ŚWIATŁOWODOWE

Streszczenie: Duża odporność na zakłócenia elektromagnetyczne toru transmisyjnego wykonanego z wykorzystaniem włókna światłowodowego, a także bardzo szerokie pasmo modulacyjne tego typu toru stwarza możliwość budowy łączy transmisyjnych o dużej szybkości modulacji pracujących w warunkach silnych zakłóceń. W artykule przedstawiono wyniki uzyskane przy realizacji modelu liniowego łącza światłowodowego, a także krótkie wprowadzenie do techniki światłowodowej.

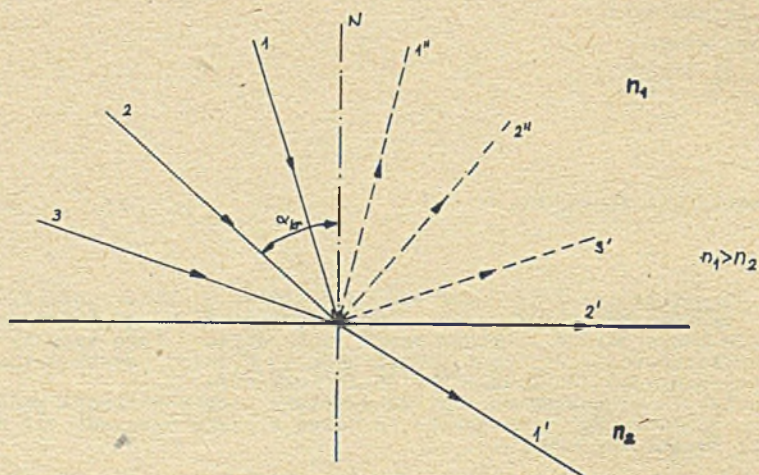
Sposób transmisji informacji na obiektach, w których występują silne zakłócenia, rzutuje istotnie na pewność i niezawodność systemu sprzężenia obiektu z układem wejścia/wyjścia komputera. Ze względu na to rozważono w opracowaniu sposób transmisji różny od transmisji przewodowej. Rozwój bazy materiałowej i elementów optoelektronicznych w Polsce umożliwi wykorzystanie do transmisji torów światłowodowych.

Światłowody wykorzystywane są do transmisji fali elektromagnetycznych o długości fali $0,4\text{--}1,6\ \mu\text{m}$, a więc w zakresie światła widzialnego i bliskiej podczerwieni. Dla długości fali z tego zakresu opanowane są techniczne metody produkcji ([2],[3]) nadajników (diody LED typu Burrusa, diody krawędziowe, lasery półprzewodnikowe), odbiorników (diody lawinowe, fotodiody p-i-n) oraz włókien światłowodowych kwarcowych [1]. Teoretycznie w systemach transmisji światłowodowej istnieje możliwość uzyskania pasma modulacyjnego rzędu tysiąca GHz. Częstotliwości graniczne przy kluczowaniu nośnej dla transmisji cyfrowej ograniczone są obecnie w torach tego typu pasmem granicznym stosowanych nadajników i odbiorników.

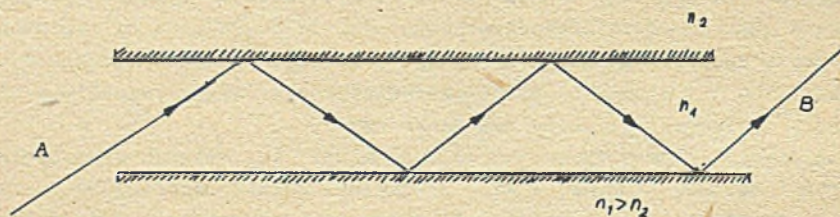
Transmisja światłowodowa charakteryzuje się odpornością na zakłócenia, bezpieczeństwem (brak iskrzenia przy uszkodzeniach toru), a także małym zużyciem materiału (1 g kwarcu = 10 kg miedzi [2]). Istnieje możliwość wykorzystania bardzo licznych włókien światłowodowych nie oddziałujących na siebie (średnica włókna $\sim 125\ \mu\text{m}$) w jednym kablu transmisyjnym.

1. FIZYKALNE PODSTAWY PRZESYŁANIA INFORMACJI ŚWIATŁOWODEM

Fizykalną podstawą przesyłania informacji światłowodem jest zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia promienia światła na granicy dwóch ośrodków o różnych współczynnikach załamania (rys. 1). Zachodzi to przy kątach padania $\alpha > \alpha_{kr}$.



Rys. 1. Ilustracja przypadku całkowitego wewnętrznego odbicia



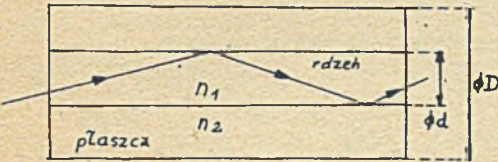
Rys. 2. Rdzeń światłowodowy

W przypadku $\alpha < \alpha_{kr}$ promień padający częściowo się załamuje i odbija, powodując zmniejszenie energii strumienia odbitego.

Dla przypadku wewnętrznego odbicia $\alpha > \alpha_{kr}$ straty energii są minimalne (zależne od tłumienności materiału włókna). W wypadku odpowiedniego ukształtowania geometrii (rys. 2) dwóch ośrodków oraz zapewnienia warunków wewnętrznego odbicia można uzyskać transmisję światła między nadajnikiem A a odbiornikiem B.

2. TYPY ŚWIATŁOWODÓW

Światłowod wykonany jest z włókna najczęściej szklanego [4] o współczynniku załamania n_1 , otoczonego płaszczem szklanym o współczynniku załamania n_2 , przy czym zachodzi relacja $n_1 > n_2$ (rys. 3).

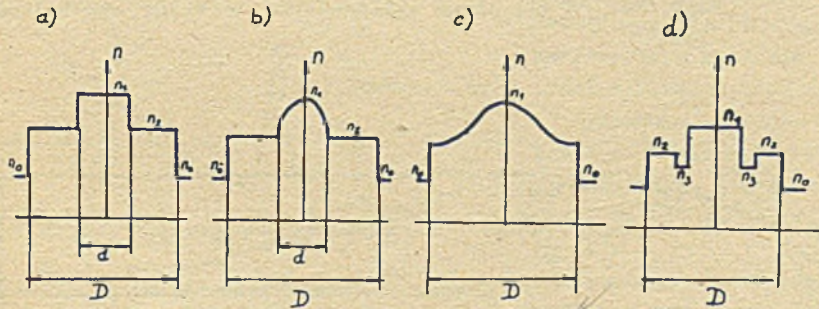


Rys. 3. Budowa światłowodu

Przybliżony opis zjawiska transmisji strumienia świetlnego ujmuje model "zig-zag", uwzględniający zasadę opisaną w punkcie 1. Dokładniejsza analiza geometryczna wymaga uwzględnienia przesunięcia Goosa-Hänche na [11]. Wzajemna zależność średnicy rdzenia i stosunku współ-

czynników załamania n_1 i n_2 dla określonej długości fali pozwala podzielić światłowody na jednomodowe i wielomodowe. Światłowody jednomodowe charakteryzują się małą dyspersją, co stwarza preferencję w ich stosowaniu w łączach transmisyjnych. Zmniejszenie dyspersji światłowodów wielomodowych możliwe jest przy kształtowaniu rozkładu współczynnika załamania światła w rdzeniu.

W związku z tym istnieje drugi rodzaj klasyfikacji ze względu na rozkład współczynnika załamania n w rdzeniu. Może być to tzw. skokowy rozkład współczynnika załamania (rys. 4a, d) bądź ciągły (rys. 4b, c).



Rys. 4. Przykłady rozkładu współczynnika załamania

a) rozkład typu step-index, b) rozkład typu parabolicznego, c) rozkład typu stopniowy - "wypukły", d) rozkład typu W - dwuwarstwowy

Wytworzenie ciągłego rozkładu współczynnika załamania (np. parabolicznego) stwarza korzystne warunki ogniskowania poszczególnych składowych fali świetlnej, co oznacza zmniejszenie strat i poszerzenia pasma częstotliwości przesyłanych sygnałów. Rysunek 4 przedstawia najczęściej cytowane w literaturze [4] typy światłowodów. Przez odpowiednie kształtowanie współ-

czynnika załamania światła w przekroju rdzenia osiąga się zmniejszenie dyspersji, co powoduje rozszerzenie pasma przenoszenia toru światłowodowego.

3. PARAMETRY WŁÓKIEN ŚWIATŁOWODOWYCH

Do podstawowych parametrów włókien światłowodowych należą:

- apertura numeryczna
- tłumienność
- dyspersja.

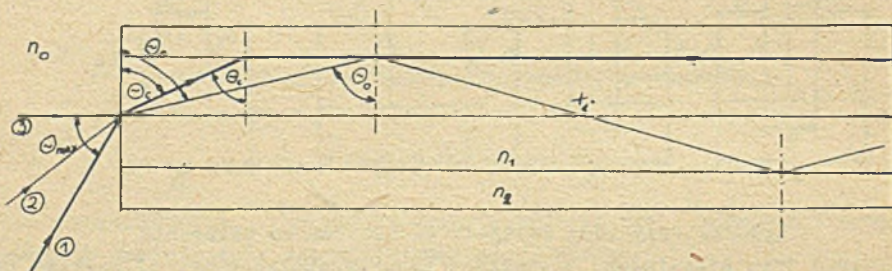
Apertura numeryczna (NA) jest miarą kąta przestrzennego, wewnątrz którego musi znaleźć się promień światła, aby został wprowadzony do rdzenia światłowodowego (rys. 5).

W przypadku przeciwnym nie będzie zachodziło zjawisko całkowitego wewnętrznego odbicia w rdzeniu, a fala padająca na skutek załamania do obszaru płaszczki światłowodowej zostanie stłumiona.

Apertura numeryczna światłowodowej określona jest relacją:

$$(NA) = \sin \theta_{\max} \quad (1)$$

gdzie θ_{\max} - jest największym kątem padania promienia światła wprowadzanego do światłowodowej i mierzonego względem jego osi, przy którym jeszcze na granicy rdzeń-płaszczki w światłowodowej strumień światła ① ulega całkowitemu odbiciu wewnętrznemu (rys. 5).



Rys. 5. Apertura numeryczna i dyspersja w światłowodzie

Przyjmując, że współczynnik załamania światła w próżni wynosi n_0 , dla światłowodowej o rozkładzie współczynnika załamania rdzenia przedstawionym na rys. 4a możemy napisać zgodnie z prawem Snelliusa:

$$n_0 \sin \theta_{\max} = n_1 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_c \right) = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \sin^2 \theta_c} \quad (2)$$

Na granicy rdzeń-płaszcz dla promienia (1) można napisać:

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \quad (3)$$

Uwzględniając (2) i (3) w (1) otrzymujemy:

$$(NA) = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (4)$$

Tłumienność strumienia świetlnego wyraża zmianę mocy sygnału na wyjściu światłowodu względem mocy sygnału doprowadzonego do wejścia światłowodu i jest wyrażony w decybelach na jednostkę długości włókna.

Wartość tłumienia zależy od rodzaju i czystości materiału, z jakiego wykonany jest światłowod oraz od długości fali padającego światła.

Typową zależność tłumienności światłowodu o małych stratach od długości fali światła przedstawia rys. 6 dla szkła kwarcowego [12]. Dla celów transmisji wykorzystuje się tę długość fali świetlnej, dla której charakterystyka wykazuje wartości minimalne tłumienia.

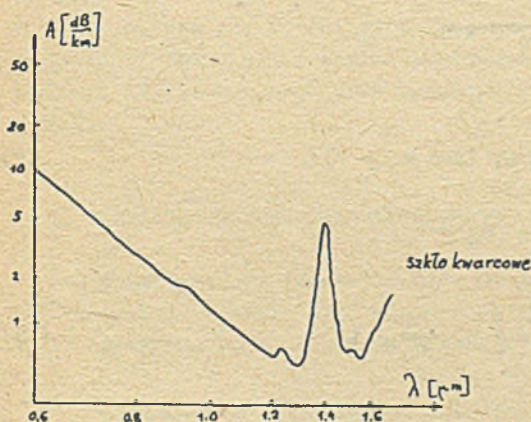
Dyspersja obrazuje wydłużenie i rozszczępienie impulsu świetlnego w czasie transmisji wyrażone zazwyczaj w $\frac{ns}{km}$ [4].

Zjawisko to występuje w wyniku przebywania różnych dróg wewnątrz w rdzeniu światłowodu przez poszczególne promienie świetlne stanowiące czoło fali.

Oznaczając przez x_1 (rys. 5) drogę przebytą przez promień świetlny między dwoma kolejnymi odbiciami od warstwy płaszcza światłowodu, a także korzystając z przybliżonego modelu geometrycznego można napisać:

$$\sum_1 x_1 \sin \theta_c = l \quad (5)$$

gdzie l - długość światłowodu równa drodze strumienia (3) wprowadzonego osiowo do światłowodu.



Rys. 6. Tłumienność światłowodów o małych stratach

Różnica $\Delta l = l' - l$, powodująca dyspersję, wyniesie:

$$\Delta l = l(\sec \theta_0 - 1) \quad (6)$$

Przez l' oznaczono drogę, jaką przebywa strumień światła (2) wprowadzony do światłowodu, gdyż:

$$\sum_1 x_1 = l' = l \sec \theta_0 \quad (7)$$

Oznaczając przez v prędkość światła w rdzeniu oraz przez c prędkość światła w próżni czas opóźnienia wynikający z różnicy dróg promieni (2) i (3) wyniesie:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{v} = \frac{l}{v} (\sec \theta_0 - 1) \quad (8)$$

Prędkość v związana jest z prędkością c relacją [10]:

$$n_0 c = n_1 v$$

Ostatecznie więc otrzymujemy:

$$\Delta t = \frac{l}{c} n_1 (\sec \theta_0 - 1) \quad (9)$$

Największe opóźnienie wystąpi dla $\theta_0 = \theta_c$.

Zatem:

$$\Delta t_{\max} = \frac{l}{c} n_1 \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \quad (10)$$

Relacja (10) określa miarę dyspersji światłowodu typu step-index.

Zmniejszenie dyspersji w światłowodzie możliwe jest przez odpowiednie kształtowanie rozkładu współczynnika załamania w rdzeniu (rozkłady paraboliczne i podobne) uzyskiwane w procesie technologicznym produkcji światłowodu [1, 4].

4. NADAJNIKI I ODBIORNIKI ŚWIATŁA

Podstawowym elementem każdego łącza światłowodowego jest źródło światła. W tym zakresie stosowane są: diody elektroluminescencyjne (LED), diody superluminescencyjne (DSL) emitujące promieniowanie niekoherentne oraz lasery złączone - źródła promieniowania koherentnego. LED wykorzystywane jako nadajniki światła powinny zapewniać dużą luminację energetyczną,

krótki czas przełączania i wąskie widmo emisji w paśmie małej tłumienności toru światłowodowego. Diody nadawcze powinny zapewnić ponadto dobre sprzężenie optyczne z włóknami światłowodowymi. Przykładem może być dioda LED biheterozłączowa Burrusa bezpośrednio sprzężona ze światłowodem szklanym [5, 7].

Pasma emisyjne LED mają w przybliżeniu kształt krzywej Gaussa o szerokości 20 ± 40 nm, a czasy przełączania rzędu 1 ± 30 ns.

Diody DSL wykorzystujące zjawisko tzw. ukierunkowanej emisji spontanicznej odznaczają się w porównaniu z diodami LED większą mocą emitowanego promieniowania (średnio 25 razy większą).

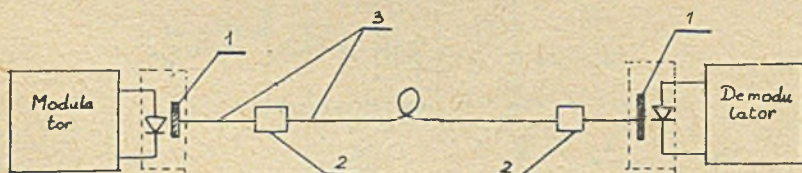
Trzecią, najważniejszą grupą półprzewodnikowych źródeł promieniowania są lasery złączowe charakteryzujące się znacznie węższym pasmem emitowanych częstotliwości, przy czym cała moc jest skupiona w postaci wiązki o małej rozbieżności. Moc średnia promieniowania lasera, np. homozłączowego wynosi 500 mW. Jest to wielkość 250 razy większa od typowej dla diody LED typu Burrusa.

Odbiornikami światła stosowanymi w łączach światłowodowych są detektory promieniowania zamieniające modulowany strumień światła na sygnał elektryczny.

Do nich zalicza się fotodiody p-i-n oraz fotodiody lawinowe krzemowe [5]. Zazwyczaj konstrukcja fotodiod dostosowana jest do określonego przedziału długości fal stosowanych przy transmisji (najczęściej 800-900 nm i wyższych).

5. KONSTRUKCJA TORU ŚWIATŁOWODOWEGO

Tor światłowodowy (łącze) zbudowany jest z nadajnika (modulatora), włókna światłowodowego oraz odbiornika (detektora, demodulatora). Elementy te sprzężone są w całość za pomocą złącz (rys. 7).



- 1 - sprzężacz światła
- 2 - złącze światłowodowe
- 3 - włókno światłowodowe

Rys. 7. Tor światłowodowy

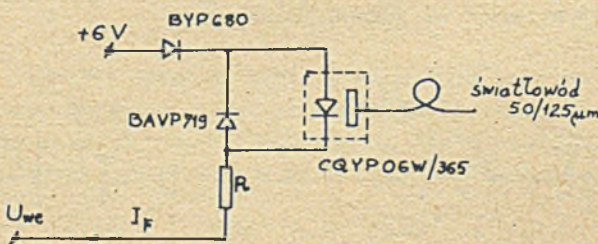
Z technicznego punktu widzenia dla realizacji toru konieczne jest zrealizowanie połączeń elementów w sposób zapewniający dużą sprawność (małe tłumienie). Uzyskuje się to przez stosowanie nadajników i odbiorników o odpowiedniej konstrukcji (technologia wytwarzania [3]) oraz precyzyjnego sprzężenia odcinków włókna światłowodowego (złącza światłowodowe).

O sprawności złącza (mocy transmitowanej) w zasadzie decyduje konstrukcja nadajnika. Odbiornik natomiast można zrealizować przez centrowanie wyjścia toru (włókna światłowodowego) z aktywną powierzchnią fotodiody odbiorczej. Aktywna powierzchnia fotodiody w typowych przypadkach wynosi $0,5 \pm 0,75 \text{ mm}^2$. Prosta metoda łączenia odcinków światłowodu jest centrowanie i unieruchomienie końców włókna o poprawnych przełomach.

Realizacja poprawnego przekomu światłowodu wymaga zastosowania utwardzonego ostrza (diamentowego lub wykonanego z węgliku spiekane) o odpowiednim kształcie. Operacji cięcia światłowodu dokonuje się przy naprężeniu włókna zależnym od średnicy płaszcza przy odpowiednim ugięciu światłowodu (przekomy lustrzane [6]).

6. MODEL ŁĄCZA

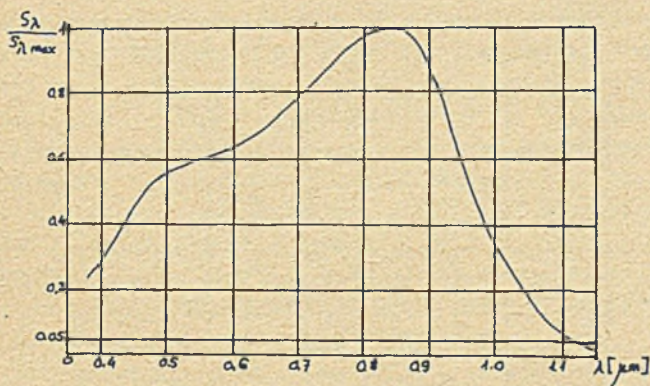
W wykonanym modelu łącza liniowego jako nadajnik zastosowano diodę elektroluminescencyjną o wysokiej luminacji energetycznej CQYP OG W, sprzężoną ze światłowodem wytworzonym w Zakładzie Chemii Fizycznej Uniwersytetu Marii Skłodowskiej-Curie w Lublinie. Dioda ta emituje promieniowanie o długości fali $\lambda \approx 905 \text{ nm}$ i mocy $\sim 1.3 \mu\text{W}$ (przy prądzie $I_F = 100 \text{ mA}$). Czas narastania impulsu dla diody wynosi około 10 ns [7]. Schemat ideowy nadajnika przedstawiono na rys. 8.



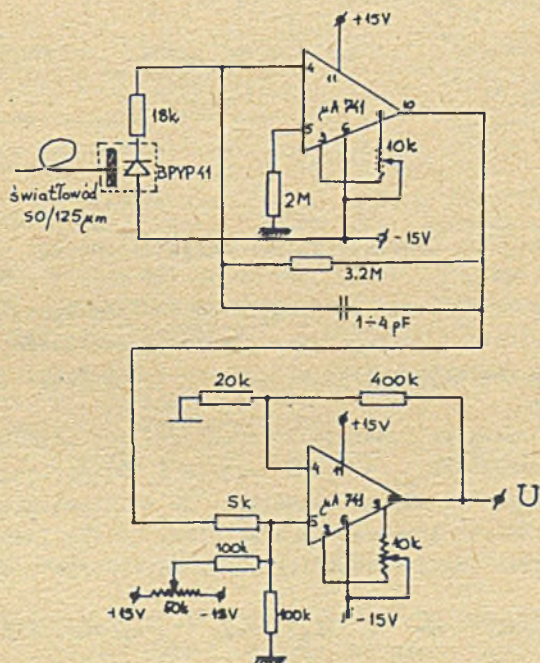
Rys. 8. Schemat ideowy nadajnika

Jako linię transmisyjną wykorzystano światłowód wytworzony w Zakładzie Chemii Fizycznej UMCS w Lublinie $50/125 \mu\text{m}$ o tłumienności około 3 dB/km dla długości fali $0,9 \mu\text{m}$. Jest to światłowód typu step-index o aperturze numerycznej (NA) ≈ 0.17 . Długość linii wynosi około 35 m .

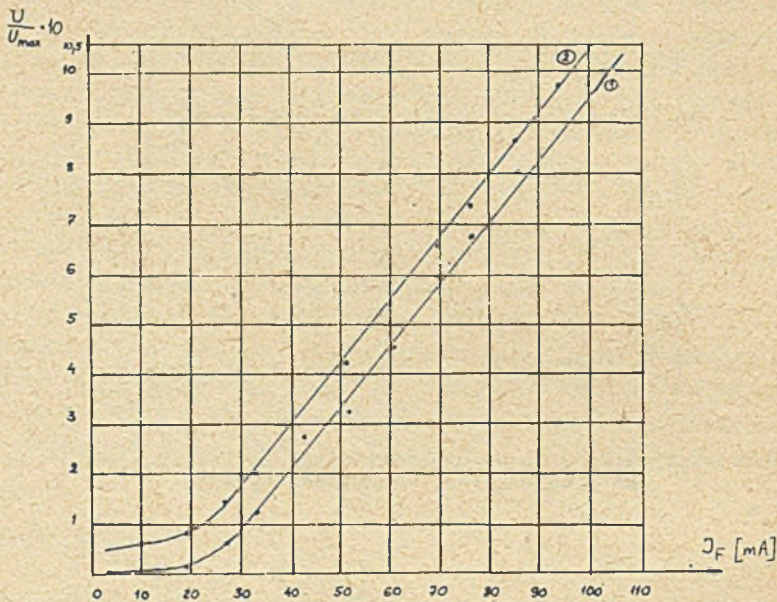
Z uwagi na relację (10) jednostkowa dyspersja $\frac{\Delta t_{\text{max}}}{L}$ wynosi około 21 ns/km .



Rys. 9. Charakterystyka widmowa czułości diody BPYP-41 S_λ [A/W] - czułość na promieniowanie monochromatyczne



Rys. 10. Schemat ideowy odbiornika



- 1) $\left(\frac{U}{U_{max}}\right)_{inf}$
- 2) $\left(\frac{U}{U_{max}}\right)_{sup}$

Rys. 11. Charakterystyka łącza liniowego

Odbiornikiem w łączu jest krzemowa fotodioda wielkiej częstotliwości ($f_g = 200$ MHz) BPYP41, współpracująca z przedwzmacniaczem zbudowanym z elementów $\mu A741$. Charakterystykę widmową czułości fotodiody przedstawiono na rys. 9 [8].

Schemat ideowy odbiornika przedstawiono na rys. 10, natomiast charakterystykę łącza liniowego $U/U_{max} = f(I_F)$ (rys. 8 i 10) obrazuje rys. 11.

W przedziale zmian prądu nadajnika $I_F = 30 \div 100$ mA charakterystyka łącza jest w przybliżeniu liniowa. Na szum diody detekcyjnej składają się dwie składowe - szum dużej częstotliwości i fluktuacje prądu małej częstotliwości.

Rozrzut charakterystyki $\frac{U}{U_{max}} = f(I_F)$ (rys. 11) spowodowany szumami diody detekcyjnej wynosi $\left(\frac{U}{U_{max}}\right)_{pp} \cong 0,024$ dla dużych częstotliwości oraz $\left(\frac{U}{U_{max}}\right)_{pp}^{fm} \cong 0,05$ dla małych częstotliwości.

7. PODSUMOWANIE

Rozrzut charakterystyki ma wpływ na właściwości dynamiczne łącza. Głównym celem pracy było zbudowanie i pomiary charakterystyki stytycznej łącza światłowodowego. Wystawiając jednak diodę nadawczą bramką TTL napięciem U_{we} a napięciem U odbiornika bramką Schmitta uzyskano łącze dla transmisji binarnej o szybkości modulacji nie przekraczającej 80 kbodów, co jest oczywiście wynikiem dynamiki zastosowanego odbiornika.

Autorzy pragną wyrazić podziękowanie prof. zw. dr hab. Andrzejowi WAKSMUNDZKIEMU z Zakładu Chemii Fizycznej UMCS w Lublinie, doc. dr hab. inż. Bohdanowi MROZIEWICZOWI z Instytutu Technologii Elektronowej UNITRA-CSEMI w Warszawie, mgr Jerzemu WOJCIKOWI z Zakładu Chemii Fizycznej UMCS w Lublinie oraz mgr inż. Romanowi BURLIKOWSKIEMU z Okręgowego Laboratorium Poczty i Telekomunikacji w Lublinie za pomoc w skompletowaniu elementów łącza światłowodowego.

LITRATURA

- [1] WÓJCIK J., GORGOL A., DEMIDZIUK W., PAROL N., TADEUSIAK A.: Otrzymywanie światłowodów kwarcowych dla potrzeb telekomunikacji, II Krajowe Symp., Vol. II, Jabłonna 13-15 luty 1979, PAN, Komitet Elektroniki i Telekomunikacji, Warszawa 1979.
- [2] SMOLINSKI A.: Światłowody i ich zastosowanie w świetle ekspertyzy PAN. Nauka Polska, Ossolineum, Nr 10, Rocznik XXVII, Wrocław 1979.
- [3] Światłowody i ich zastosowania, Vol. I, II Krajowe Symp., Jabłonna 13-15 luty 1979, PAN, Komitet Elektroniki i Telekomunikacji, Warszawa 1979.
- [4] PASZKOWSKI B.: Włókna światłowodowe, Ossolineum, Wrocław 1978.
- [5] MROZIEWICZ B., JAROMINSKI J., WĘGRZECKA I., WĘGRZECKI M., SZYMAŃSKI L.: Optyczne systemy transmisyjne, Elektronizacja, z. 4, WKŁ, Warszawa 1978.
- [6] JASIEWICZ W.: Urządzenie do cięcia światłowodów szklanych, II Krajowe Symp., Vol. II, Jabłonna 13-15 luty 1979, PAN, Komitet Elektroniki i Telekomunikacji, Warszawa 1979.
- [7] Karta Katalogowa diody CQYP OG W, Instytut Technologii Elektronowej CEMI, Warszawa 1980.
- [8] Karta katalogowa fotodiody BPYP41, Instytut Technologii Elektronowej CEMI, Warszawa 1979.
- [9] Optoelectronics Designer's Catalog 1980, Hewlett-Packard, Palo Alto, 1980.
- [10] MEYER-ARENDE J.R.: Wstęp do optyki, WNT, Warszawa 1979.
- [11] GAMBLING W.A. i inni: Optical Fibres and the Goos-Hänchen Shift, Electronics Letters, Vol. 10, No 7, 1974.
- [12] SMOLINSKI A.: Światłowody oraz ich zastosowania, Ossolineum, Wrocław 1980.

Wpłynęło do Redakcji: 25.03.1981 r.

W ostatecznej formie przyjęto: 22.05.1981 r.

Recenzent:

dr inż. Ryszard Romaniuk

ЛИНЕЙНАЯ СВЕТОВОДНАЯ ЛИНИЯ СВЯЗИ

Р е з ю м е

Большая сопротивляемость на электромагнитные помехи трансмиссионной линии связи, содержащей световодное волокно, а также его широкий модуляционный диапазон, создает возможность построить линию связи, работающую в широком модуляционном диапазоне в условиях сильных помех. В статье представлены результаты, полученные во время осуществления модели линейной световодной линии связи, а также краткое введение в основы световодной техники.

THE LINEAR FIBER OPTIC LINK

S u m m a r y

The great electromagnetic noise resistance of the fiber optic transmission line and its very large modulation wideband, enable to built the fiber optic link for high speed data transmission operating in the noise conditions. Some results obtained in the process of realization of linear fiber optic link and a short introduction into fiber optic technique are presented.