

Fizyczne podstawy transmisji i przechowywania informacji FPTUZ PROJEKT

Maciej Antosz (310777)

Maj 2025

Spis treści

1	Treść projektu	2
2	Część teoretyczna	3
2.1	Zjawiska występujące w łączy światłowodowym	3
2.2	Wzory z podręcznika	4
3	Wyznaczenie i uzasadnienie trasy	5
3.1	Topologia i technologia łączy	6
3.2	Sposób realizacji	6
4	Obliczenia dla zaprojektowanego łączy	7
4.1	Długość łączy – 80 km	7
4.2	Straty na spawach i złączach	8
4.3	Tłumienie wynikające z kompensacji dyspersji	8
4.4	Czułość odbiornika (fotodiody)	9
4.5	Margines systemowy – 1 dB	9
4.6	Moc lasera	9
4.7	Wnioski	10
5	Porównanie z parametrami rzeczywistymi	11
6	Analiza wykresów	12
7	Podsumowanie i wnioski końcowe	15
8	Bibliografia	15

1 Treść projektu

Pomiedzy dwoma miastami / wsiami (punkty skrajne podano w poniszej tabeli) chcemy 'zbudować' łącze światowodowe bez wzmacniaczy o przepływności 1 Gb / s, 5 Gb / s, 20 Gb / s. W zależności od przepływności zaprojektowanego łącza wskaż, który laser byłby najlepszy do jego realizacji, skorzystaj z równania budżetu mocy (pamiętaj o zasadzie podanej w punkcie 2b – Wykonanie projektu). Potrzebne parametry laserów odczytaj z kart katalogowych (laser-1, laser-2).

Do realizacji sieci wykorzystaj światłowód SMF-28.

Do kompensacji dyspersji należy użyć a) modułu DCM i b) światłowodu PMDCF (pamiętaj o umieszczeniu obliczeń i uzasadnień).

Karty katalogowe światłowodu, elementów kompensujących i laserów zamieszczone zostały na stronie przedmiotu w zakładce „Materiały dydaktyczne” – Karty katalogowe.

Założ, że straty na spawach i złączach wynoszą odpowiednio AS - 1 spaw i AC - 1 złącze. Spawy na światłowodzie SMF-28 należy wykonać co Ls. W budżecie mocy uwzględnij podany w poniższej tabelce margines.

Czułość fotodiody PIN wylicz ze wzoru z podręcznika, założ że sprawność fotodiody PIN wynosi 25% (Przedstaw wyliczenia, a nie sam wynik). Uzasadnij zastosowany wzór/metodę uwzględniającą sprawność fotodiody i ilość fotonów.

Omów poszczególne etapy projektu i wpływ zastosowanych elementów/parametrów na działanie łącza. Porównaj różne przypadki. Może się zdarzyć, że podane ogólnie parametry znacząco odbiegają od wartości rzeczywistych, wtedy proszę to odpowiednio skomentować.

Po wykonaniu obliczeń uzyskane wyniki przedstaw w postaci tabel i wykresów a następnie zinterpretuj je.

Opcjonalnie potrzebne do porównania parametry elementów znajdź na stronie producentów np. Corning, Thorlabs.

Do obliczeń najlepiej jest wykorzystać np. Excel lub samemu napisać skrypt (liczenie za pomocą kalkulatora znacząco wydłuży pracę). Pamiętaj o załączeniu pliku z obliczeniami.

Nr	Miasto A	Miasto B	LS [km]	AC [dB]	As [dB]	Margi nes [dB]
2	Trzebielino 77-235	Lębork	20	0.5	0.1	1

2 Część teoretyczna

2.1 Zjawiska występujące w łączy światłowodowym

Tłumienie we włóknach światłowodowych

Tłumienie to zmniejszenie mocy sygnału optycznego podczas jego propagacji przez światłowód. Przyczynami tłumienia są: absorpcja, rozpraszanie Rayleigha, mikro- i makrozgięcia włókna. Tłumienie wyraża się w jednostkach dB/km. Dla trzeciego okna telekomunikacyjnego (1550 nm) typowe tłumienie wynosi 0,2–0,25 dB/km. Tłumienie całkowite obliczamy jako:

$$A_t = \alpha \cdot L$$

gdzie: A_t – tłumienie toru transmisyjnego [dB], α – tłumienie liniowe [dB/km], L – długość światłowodu [km].

Dyspersja chromatyczna

Dyspersja wynika z faktu, że różne długości fal poruszają się z różnymi prędkościami. Powoduje to rozciąganie impulsów w czasie, co ogranicza przepływność łącza. Współczynnik dyspersji wynosi około 17 ps/(nm·km). Sumaryczna dyspersja:

$$D = D_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

gdzie: D – dyspersja całkowita [ps], D_λ – współczynnik dyspersji [ps/(nm·km)], $\Delta\lambda$ – szerokość spektralna źródła [nm], L – długość światłowodu [km].

Dyspersja polaryzacyjna (PMD)

PMD wynika z różnicy w czasie propagacji dla dwóch prostopadłych polaryzacji światła. Opisuje się ją przez wartość DGD (Differential Group Delay) w ps/ $\sqrt{\text{km}}$.

Straty na spawach i złączach

Spawy generują straty rzędu 0,05–0,15 dB, a złącza 0,3–0,75 dB. Łączne straty:

$$A_c = n \cdot AS + m \cdot AC$$

gdzie: A_c – całkowite straty na połączeniach [dB], n – liczba spawów, AS – strata na jednym spawie [dB], m – liczba złączy, AC – strata na jednym złączu [dB].

Budżet dyspersji i kompensacja

W przypadku dużych odległości stosuje się kompensatory dyspersji (DCM, PMDCF) o ujemnym współczynniku dyspersji. Pozwalają one „zrównoważyć” efekt dyspersji.

2.2 Wzory z podręcznika

1. Budżet mocy

$$P_S - P_C - A_t - A_K = P_R + PM$$

gdzie: P_S – moc źródła [dBm], P_C – straty na złączach i spawach [dB], A_t – tłumienie toru transmisyjnego [dB], A_K – straty na kompensacji [dB], P_R – czułość odbiornika [dBm], PM – margines bezpieczeństwa [dB].

2. Czułość fotodiody PIN

$$P_R = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{n_0 \cdot h \cdot f \cdot B_0}{10^{-3} \cdot \eta} \right)$$

gdzie: n_0 – liczba fotonów na bit, h – stała Plancka ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s), f – częstotliwość fali [Hz], B_0 – przepływność [bit/s], η – sprawność fotodiody (np. 0,25).

3. Długość fali a częstotliwość

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

gdzie: c – prędkość światła w próżni ($3 \cdot 10^8$ m/s), λ – długość fali [m].

4. Dyspersja całkowita

$$D = D_\lambda \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

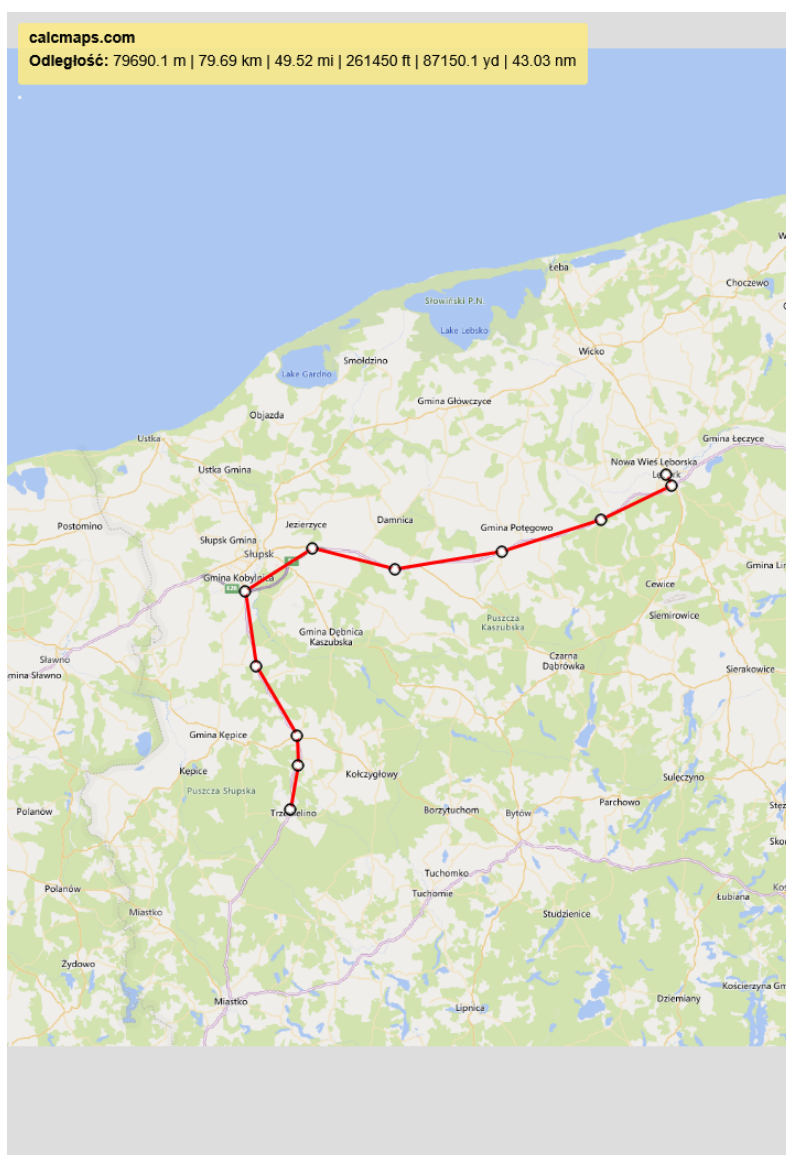
3 Wyznaczenie i uzasadnienie trasy

Projektowana trasa łączy światłowodowego łączy miejscowości Trzebielino (77-235) oraz Lębork w województwie pomorskim.

Na podstawie analizy map drogowych oraz realnych uwarunkowań infrastrukturalnych, zaproponowano trasę wzdłuż tras szybkiego ruchu i dróg wyższej klasy. Wybór ten wynika z braku innych możliwości. Próby poszukiwania istniejącej (i dostępnej) infrastruktury, skończyły się niepowodzeniem.

Trzebielino → Zielin → Suchorze → Kruszyna → Łosino → Redzikowo → Domardz → Darżyno → Pogorzelice → Lęborko (rondo Jana Pawła II i Bolesława Krzywoustego) → Lębork (centrum).

Szacowana długość trasy: około 80 km (z dokładnością do 1 km).



Rysunek 1: Trasa projektowanego łączy

Zaproponowany przebieg został wybrany ze względu na obecność tras szybkiego ruchu oraz dróg krajowych i wojewódzkich, co sprzyja dostępności pasów technicznych. Ułatwia to instalację światłowodu oraz przyszły serwis i konserwację infrastruktury. Alternatywne warianty prowadzące przez mniejsze drogi lokalne zostały odrzucone ze względu na większe ryzyko kolizji z inną infrastrukturą oraz trudniejszy dostęp terenowy.

Dodatkowo rozważano inne opcje, takie jak:

- Sieć szerokopasmowa: Ograniczona dostępność i skomplikowane warunki zabudowy.
- Trasy kolejowe: Brak bezpośredniego połączenia między punktami końcowymi.
- Linie energetyczne: Wyższe koszty inwestycyjne oraz trudniejszy serwis.

3.1 Topologia i technologia łącza

Projekt zakłada topologię punkt–punkt. Trasa przebiega wzdłuż nowoczesnych dróg szybkiego ruchu, co zwiększa prawdopodobieństwo istnienia lub możliwości instalacji kanalizacji technicznej. Dodatkowo ułatwia prowadzenie robót oraz skraca czas realizacji projektu.

3.2 Sposób realizacji

W przypadku, gdyby istniejąca infrastruktura nie odpowiadała wymaganiom lub podczas implementacji doszłoby do nieoczekiwanych komplikacji można rozważyć potencjalne metody budowy:

- instalacja w kanalizacji teletechnicznej (ziemna),
- zawieszenie na słupach (napowietrzna),
- mikrorurki z wydmuchem włókien optycznych.

Wybór konkretnej metody zależy od warunków lokalnych oraz budżetu inwestycji.

4 Obliczenia dla zaprojektowanego łącza

Źródła danych: Dane do obliczeń zostały zaczerpnięte z kart katalogowych dostarczonych przez producentów:

Światłowód SMF-28 ULL (Corning): Tłumienność: 0.17 dB/km @1550 nm
Dyspersja: 18 ps/(nm·km) @1550 nm
Długość łącza: 80 km
Margines (z projektu): 1 dB
Straty: Spaw (AS): 0.1 dB; Złącze (AC): 0.5 dB; Odległość między spawami (Ls): 20 km.

Moduły kompensacji dyspersji: PMDCF (ThorLabs):
Dyspersja: -100 ± 10 ps/(nm·km) @1550 nm
Tłumienność: 0.45 dB/km
DCM-60A (Arris):
Kompensacja: -1020 ps/nm (60 km SMF-28)
Tłumienność: 4.7 dB

Lasery: Laser-1 (NY55D, Neon):
Moc: 40–100 mW (typowo 80 mW i 100 mW)
Długość fali: 1550 nm
RIN: -160 dB/Hz (bardzo dobry)
Laser-2 (FRL15DCWD):
Moc: max 40 mW
SMSR: > 45 dB
Wąska linia spektralna – idealny do DWDM

4.1 Długość łącza – 80 km

Długość światłowodu ma bezpośredni wpływ na całkowite tłumienie toru optycznego. Przy zastosowanej tłumienności światłowodu SMF-28 na poziomie 0,17 dB/km, całkowite tłumienie wynosi:

$$A_t = 80 \cdot 0,17 = 13,6 \text{ dB}$$

Im większa odległość, tym wyższe tłumienie i większe wymagania co do mocy nadajnika. Zwiększanie długości łącza może również zwiększać dyspersję, a co za tym idzie – konieczność zastosowania skuteczniejszych kompensatorów.

4.2 Straty na spawach i złączach

Długość trasy: 80 km. Zakładamy, że spawy wykonuje się co 20 km, czyli:

- Liczba odcinków: $\frac{80}{20} = 4$
- Liczba spawów: $4 - 1 = 3$

Do każdego odcinka światłowodowego wymagane są 2 złącza (wejście/wyjście).

Zgodnie z projektem, straty te wynoszą:

- Spawy: $0,1 \text{ dB} \times 3 = 0,3 \text{ dB}$
- Złącza: $0,5 \text{ dB} \times 2 = 1,0 \text{ dB}$

Ich suma, czyli 1,3 dB, istotnie obciąża budżet mocy. Wysoka jakość spawania i ograniczenie liczby połączeń (dłuższe odcinki światłowodowe) może znacznie poprawić parametry systemu.

4.3 Tłumienie wynikające z kompensacji dyspersji

Dyspersja chromatyczna światłowodu SMF-28 wynosi $18 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$, co przy długości łącza 80 km daje:

$$D_{\text{SMF}} = 80 \cdot 18 = 1440 \text{ ps/nm}$$

DCM-80:

- Kompensuje pełne 1440 ps/nm – idealne dopasowanie
- Z karty katalogowej wynika, że tłumienie DCM-80 wynosi: 6.3 dB

PMDCF:

- Dyspersja: $100 \text{ ps}/(\text{nm} \cdot \text{km})$
- Wymagana długość: $L = \frac{1440}{100} = 14.4 \text{ km}$
- Tłumienie: $14.4 \cdot 0.45 = 6.48 \text{ dB}$

Chociaż PMDCF zapewnia porównywalne tłumienie, DCM-80 jest lepszym wyborem – zapewnia pełną kompensację w mniejszym fizycznie module, co redukuje ryzyko dodatkowych strat oraz ułatwia integrację.

4.4 Czulość odbiornika (fotodiody)

Czulość fotodiody obliczana jest ze wzoru:

$$P_R = 10 \log_{10} \left(\frac{n_0 h f B_0}{10^{-3} \cdot \eta} \right)$$

Czulość fotodiody zależy od przepływności – im większa szybkość transmisji, tym większa energia wymagana w jednostce czasu. Obliczenia dla $n_0 = 6000$ fotonów/bit.

Dla każdej przepływności podstawiamy wartości:

$$n_0 = 6000, \quad h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}, \quad \lambda = 1550 \text{ nm}, \quad \eta = 0.25$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^8}{1.55 \cdot 10^{-6}} \approx 1.935 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

Dla 1 Gb/s:

$$B_0 = 1 \cdot 10^9 \Rightarrow P_R = 10 \log_{10} \left(\frac{6000 \cdot 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 1.935 \cdot 10^{14} \cdot 10^9}{10^{-3} \cdot 0.25} \right) \approx -25.11 \text{ dBm}$$

Analogicznie:

$$5 \text{ Gb/s} \Rightarrow P_R \approx -18.13 \text{ dBm} \quad 20 \text{ Gb/s} \Rightarrow P_R \approx -11.11 \text{ dBm}$$

Przepływność	Czulość P_R (dBm)
1 Gb/s	-25.11
5 Gb/s	-18.13
20 Gb/s	-11.11

Zwiększenie przepływności znacząco podnosi wymagania co do mocy sygnału.

Zwiększenie liczby wymaganych fotonów do 6000 (zamiast 600) odpowiada bardziej konserwatywnemu podejściu projektowemu i może być zasadne w przypadku oczekiwanej degradacji komponentów, większych zakłóceń lub wymagania wyższej niezawodności.

4.5 Margines systemowy – 1 dB

Zapas mocy w budżecie transmisyjnym pozwala na kompensację nieprzewidzianych strat: starzenie się komponentów, wahania temperatury, zabrudzenie złącz. Dobrze dobrany margines poprawia niezawodność łącza. **Dla tras powyżej 80 km warto rozważyć zwiększenie marginesu do 2–3 dB**, szczególnie w zastosowaniach przemysłowych lub długoterminowych.

4.6 Moc lasera

Ostateczna decyzja zależy od tego, czy moc lasera przekracza sumę wszystkich strat. Przykładowo:

- **Laser-1 (80–100 mW):** 19 dBm → zapewnia zapas przy 20 Gb/s z DCM-80 (6.3 dB), ale tylko przy odpowiednim zapasie mocy i niskim marginesie.
- **Laser-2 (40 mW):** 16 dBm → może być niewystarczający nawet dla 1 Gb/s przy niskiej czulości (-25.11 dBm), szczególnie z DCM-80.

4.7 Wnioski

- Zwiększona liczba wymaganych fotonów (6000) znacznie podnosi wymagania co do mocy lasera.
- Dla 1–5 Gb/s wciąż możliwe jest zastosowanie Laser-1 + PMDCF.
- Dla 20 Gb/s – wymagany jest Laser-1 z DCM-80 i ograniczony margines.
- Laser-2 może nie spełniać wymagań przy żadnej przepływności z DCM-80.

5 Porównanie z parametrami rzeczywistymi

Wyniki uzyskane w projekcie zostały porównane z wartościami typowymi:

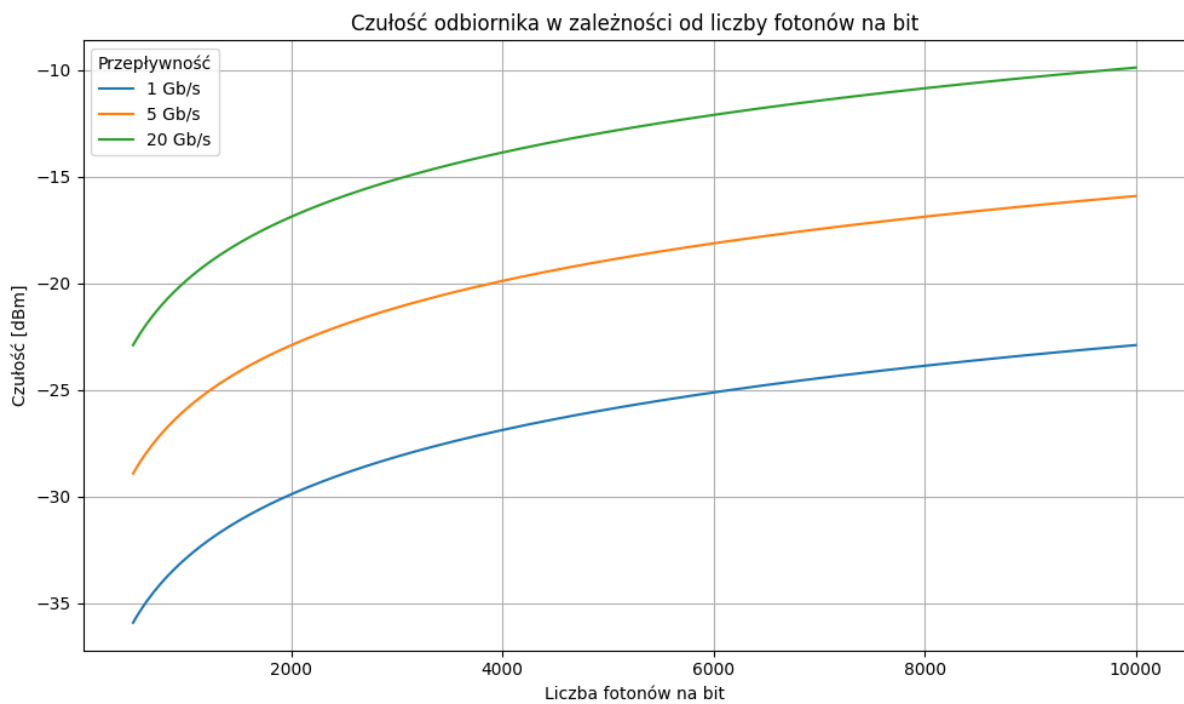
- Tłumienie toru: **13.6 dB** przy 80 km i $\alpha = 0.17$ dB/km – wartość realistyczna, zgodna z kartą SMF-28.
- Straty na spawach i złączach: **1.3 dB** – przyjęto umiarkowanie konserwatywne wartości.
- Kompensatory dyspersji:
 - **DCM-80** – kompensacja pełna: 1440 ps/nm, tłumienie: 6.3 dB
 - **PMDCF** – długość 14.4 km, tłumienie: 6.48 dB
- Czulość fotodiody: przy założeniu $n_0 = 6000$ fotonów na bit, czulość zmienia się istotnie:
 - 1 Gb/s – $P_R \approx -25.11$ dBm
 - 5 Gb/s – $P_R \approx -18.13$ dBm
 - 20 Gb/s – $P_R \approx -11.11$ dBm
- Moc nadajników: Laser-1 (19 dBm), Laser-2 (16 dBm) – odpowiadają typowym laserom DWDM.

6 Analiza wykresów

Wykonano wykres zależności czułości odbiornika od liczby fotonów na bit dla trzech przepływności (1, 5 i 20 Gb/s).

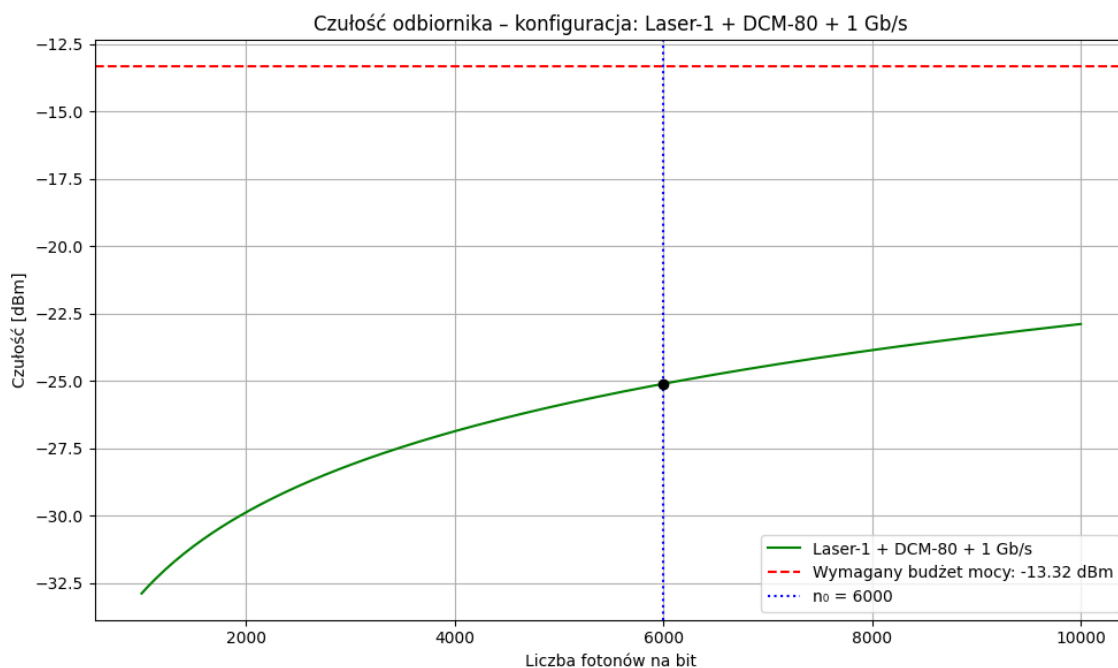
Z wykresu można zauważyć, że wraz ze wzrostem liczby fotonów n_0 wymagania dotyczące czułości odbiornika maleją (czyli wartość P_R rośnie). Przykładowo, przy $n_0 = 6000$ i przepływności 1 Gb/s, czułość wynosi ok. -25.1 dBm.

Im wyższa przepływność, tym większe wymagania energetyczne – dla 20 Gb/s czułość przy $n_0 = 6000$ wynosi aż -11.1 dBm. Pokazuje to, jak szybko rośnie wymaganie mocy przy przyspieszaniu transmisji i jak istotne staje się wtedy użycie silniejszego lasera.



Rysunek 2: Czułość odbiornika w zależności od liczby fotonów na bit

Kolejno zajęto się analizą otrzymanych w tabeli wyników, skąd wykonano wykresy konfiguracji: Laser-1 (19 dBm), kompensator DCM-60 oraz przepływność 1 Gb/s i

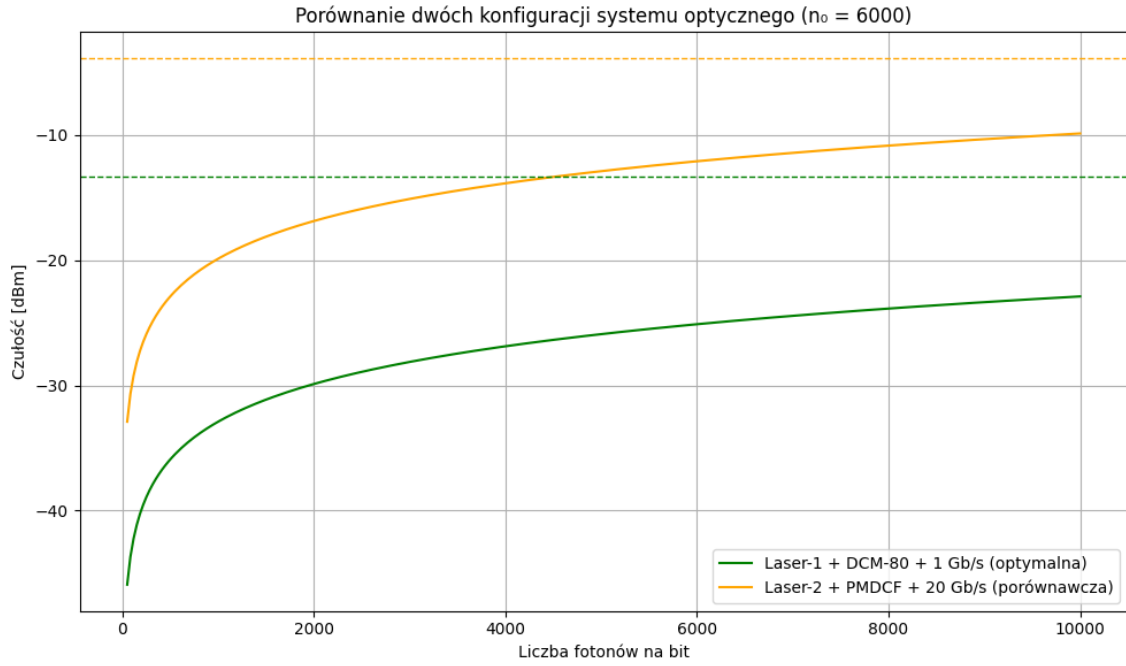


Rysunek 3: Konfiguracja Laser-1 + DCM-80 + 1 Gb/s

Dla każdej konfiguracji porównano wymaganą moc nadajnika. Najkorzystniejszą konfiguracją okazała się:

- **Laser-1 + DCM-80 + 1 Gb/s**, dla której wymagania mocy mieszczą się bezpiecznie w zakresie emitowanej mocy (19 dBm).

Laser-2 okazał się niewystarczający we wszystkich konfiguracjach – nawet dla najniższej przepływności i najlepszego kompensatora.



Rysunek 4: Porównanie konfiguracji Laser-1 + DCM-60 + 1 Gb/s i Laser-2 + PMDCF + 20 Gb/s

Wykres porównuje najoptymalniejszą konfigurację (Laser-1 + DCM-80 + 1 Gb/s) z alternatywną konfiguracją o wyższych wymaganiach. Różnica w wymaganej liczbie fotonów i czułości wyraźnie pokazuje, jak bardzo każdy element wpływa na końcowy budżet mocy.

Dlaczego Laser-2 jest niewystarczający?

Moc wyjściowa: 16 dBm. Dla konfiguracji z DCM-80 i przepływnością 20 Gb/s:

$$P_R = -11.11 \text{ dBm}, \quad A_t = 13.6 \text{ dB}, \quad P_C = 1.3 \text{ dB}, \quad A_k = 6.3 \text{ dB}, \quad M = 1 \text{ dB}$$

$$P_S = P_R + A_t + P_C + A_k + M = -11.11 + 13.6 + 1.3 + 6.3 + 1 = 11.09 \text{ dBm}$$

→ choć teoretycznie Laser-2 (16 dBm) może sprostać temu wymaganiu, zostaje jedynie zapas 4.9 dB, co w praktyce jest zbyt małe, biorąc pod uwagę możliwe degradacje. W dodatku dla innych przepływności, zapas ten gwałtownie maleje.

Dla większego bezpieczeństwa projektowego, wybrano Laser-1 (19 dBm).

7 Podsumowanie i wnioski końcowe

Po uwzględnieniu pełnej kompensacji dyspersji (DCM-80) oraz bardziej realistycznej liczby fotonów na bit ($n_0 = 6000$), projekt wymaga zastosowania komponentów o wyższej wydajności niż pierwotnie zakładano.

- **Laser-1** (moc 19 dBm) jest **konieczny** do poprawnego działania systemu we wszystkich przypadkach – również przy niskich przepływnościach.
- **Laser-2** (16 dBm) nie zapewnia wystarczającej mocy nawet przy 1 Gb/s i najlepszym kompensatorze.
- **DCM-80** zapewnia pełną kompensację dyspersji toru i ma niższe tłumienie niż PMDCF (6.3 dB vs 6.48 dB), dlatego jest preferowany.
- **Podniesienie n_0 do 6000** fotonów znacznie zaostrza wymagania dotyczące mocy i weryfikuje, które konfiguracje są realistyczne.
- Analiza wykresów potwierdziła zależność między przepływnością, liczbą fotonów i wymaganiami mocy – szczególnie przy 20 Gb/s wymagania są bardzo wysokie.

Projekt spełnia wymagania techniczne pod warunkiem zastosowania:

- Lasera klasy Laser-1,
- kompensatora DCM-80,
- ograniczonej liczby połączeń (spawy i złącza),
- marginesu zapasu co najmniej 1 dB – opcjonalnie można go zwiększyć do 2–3 dB, jeśli przewiduje się starzenie się komponentów lub pogorszenie warunków pracy.

Tym samym projekt jest wykonalny i realistyczny – ale wymaga zastosowania komponentów klasy operatorskiej.

8 Bibliografia

- Corning Inc., "SMF-28® Ultra Optical Fiber", karta katalogowa
- ThorLabs, "PMDCF Polarization-Maintaining Dispersion-Compensating Fiber", karta katalogowa
- ARRIS, "DCM Dispersion Compensation Modules", karta katalogowa
- NEON Technologies, "NY55D High power DFB laser", karta katalogowa
- Flyin, "FRL15DCWD DWDM DFB Laser Diode", karta katalogowa
- Materiały z wykładu – podręcznik akademicki dot. fizyki łącz optycznych