



TELEKOMUNIKACJA OPTOFALOWA

13. Optyczne łącza analogowe

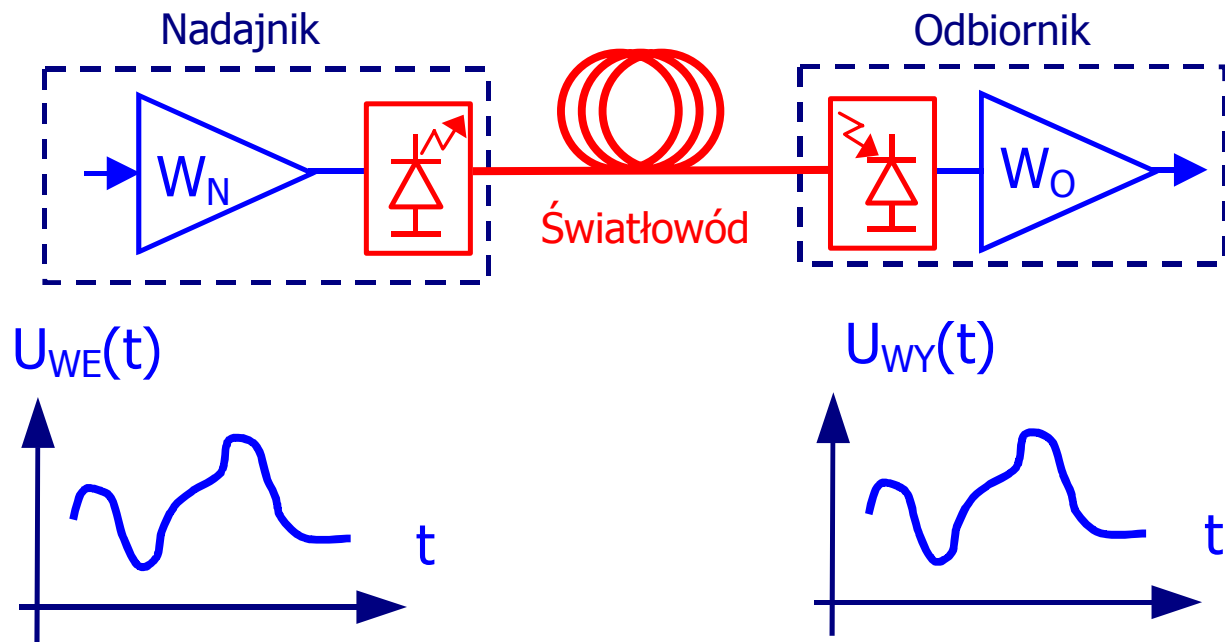
Spis treści:

- 13.1. Wprowadzenie
- 13.2. Łącza analogowe z bezpośrednią modulacją mocy
- 13.3. Łącza analogowe z modulacją zewnętrzną
- 13.4. Parametry łącz analogowych
- 13.5. Podsumowanie

13.1. WPROWADZENIE – IDEA ŁĄCZA ANALOGOWEGO

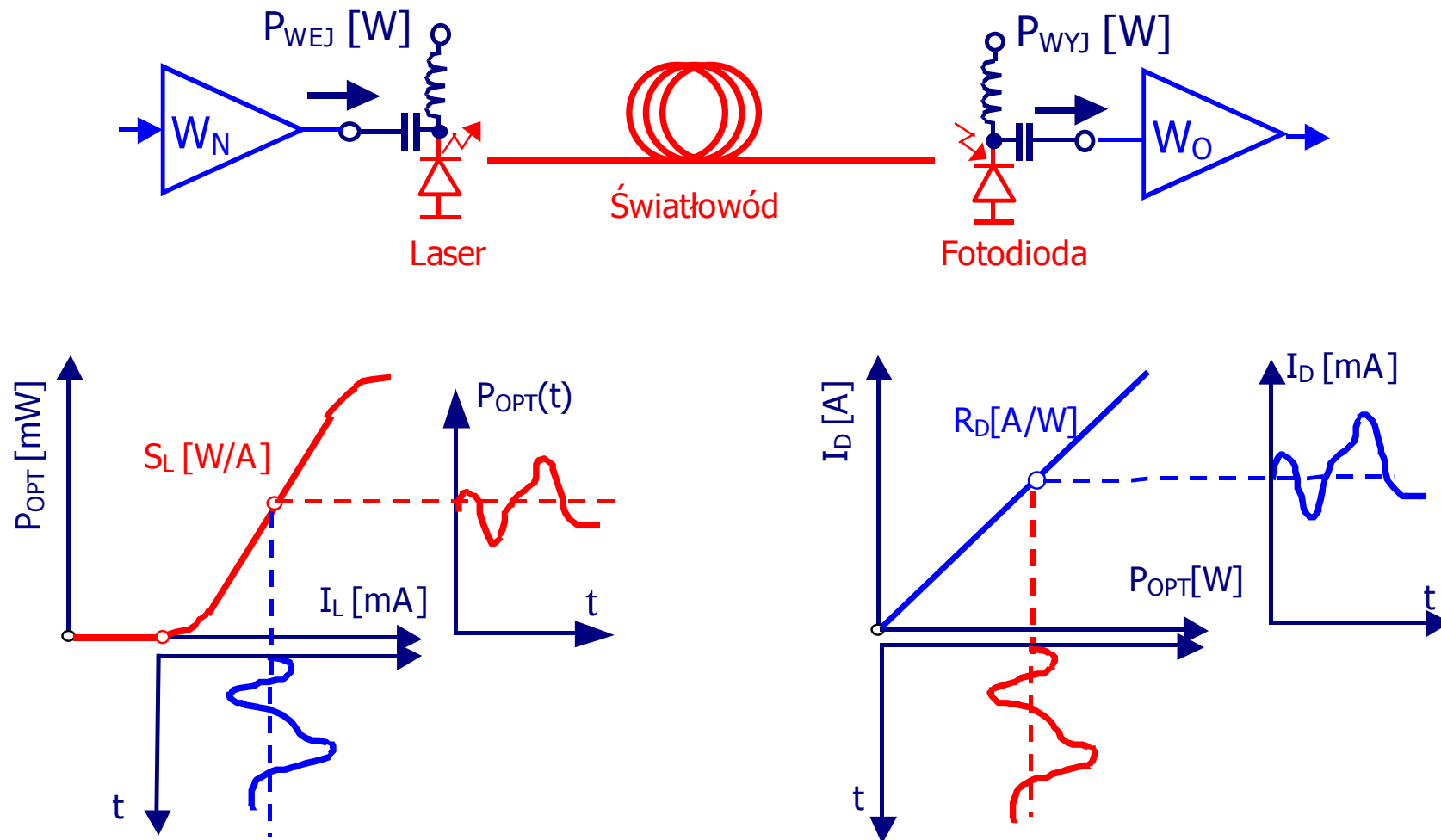
- ◆ Mimo rozwoju techniki transmisji cyfrowej, transmisja sygnałów w postaci analogowej jest ciągle istotnym elementem wielu systemów telekomunikacyjnych i radiolokacyjnych.
 - Transmisja sygnałów odbieranych przez anteny i przesyłanych do dalszej obróbki.
 - Transmisja sygnałów odbieranych i dostarczanych przez różnego typu czujki i czujniki.
 - Transmisja sygnałów w sieciach telewizji kablowej CATV.

Rys.13.1. Idea pracy optycznego łącza analogowego.



- ◆ Sygnał elektryczny po wzmacnieniu moduluje sygnał optyczny. Ten jest transmitowany do odbiornika, a po detekcji wzmacniony.

13.2. ŁĄCZA ANALOGOWE Z BEZPOŚREDNIĄ MODULACJĄ – STRUKTURA ŁĄCZA



Rys.13.2. Łącze światłowodowe z bezpośrednią modulacją mocy optycznej generowanej przez laser, oraz ilustracja procesów modulacji i detekcji.

13.2. ŁĄCZA ANALOGOWE Z BEZPOŚREDNIĄ MODULACJĄ – WZMOCNIENIE

- ◆ Można zdefiniować wzmocnienie G łącza analogowego uwzględniające sprawność konwersji:
 - mocy elektrycznej P_{WEJ} na moc optyczną przez laser,
 - mocy optycznej na elektryczną P_{WYJ} przez fotodiode.

$$G = \frac{P_{WYJ}}{P_{WEJ}} \approx \frac{I_{mD}^2}{I_{mL}^2}$$

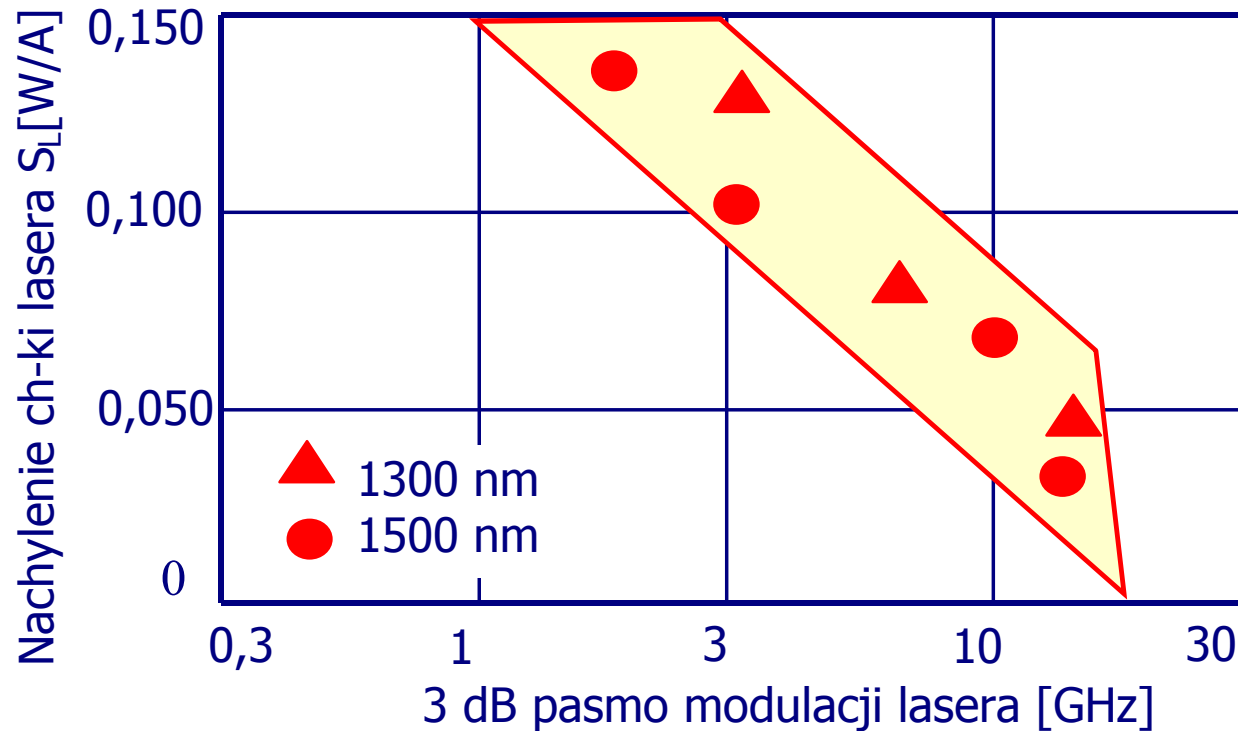
- ◆ Jeśli pominąć straty mocy optycznej w światłowodzie i w połączeniach ze światłowodem, to wzmocnienie G jest funkcją:
 - czułości modulacji lasera (nachylenia charakterystyki $P_{OPT}(I)$) $S_L[W/A]$,
 - czułości detekcji $R_D[A/W]$.

$$G = S_L^2 R_D^2;$$

- ◆ Tak definiowane wzmocnienie nie zależy od poziomu mocy wyjściowej lasera i średniego prądu fotodetektora.

13.2. ŁĄCZA ANALOGOWE Z BEZPOŚREDNIĄ MODULACJĄ – LASERY

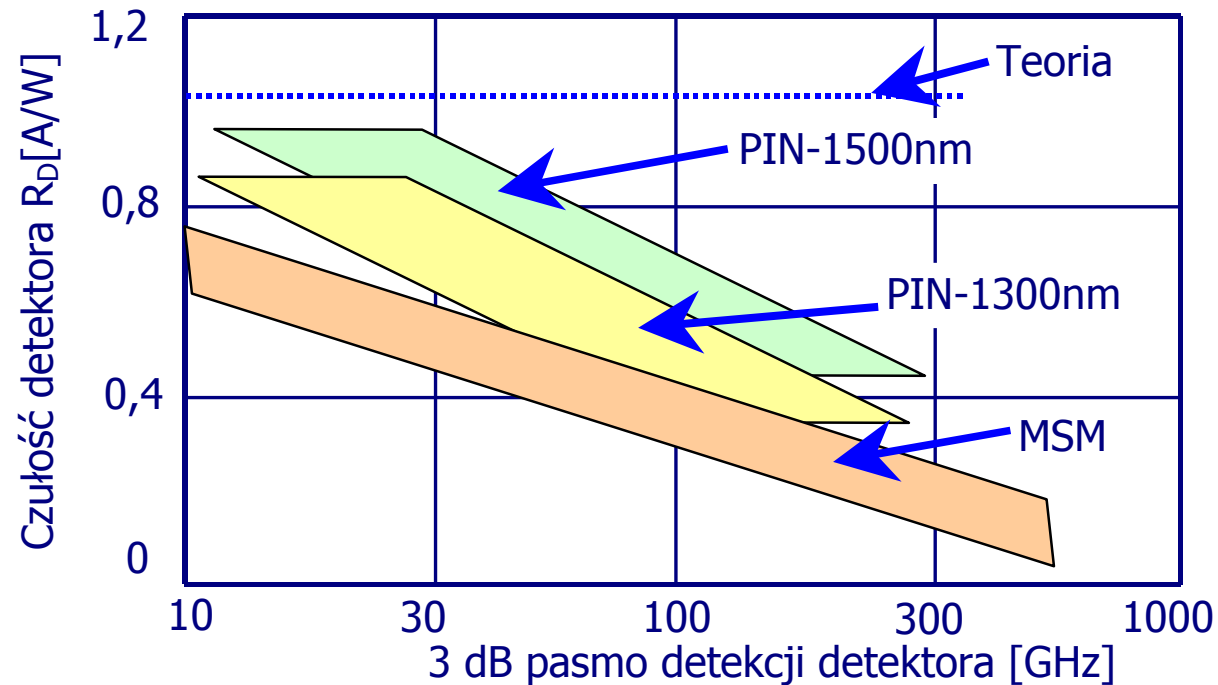
- Nachylenie charakterystyki $P_{OPT}(I)$ lasera jest rzędu 100mW/A i zależy od pasma modulacji, malejąc ze wzrostem pasma.



Rys.13.3. Wartości czułości modulacji laserów rozmaitych typów laserów półprzewodnikowych w zależności od szerokości pasma modulacji.

13.2. ŁĄCZA ANALOGOWE Z BEZPOŚREDNIĄ MODULACJĄ – FOTODETEKTORY

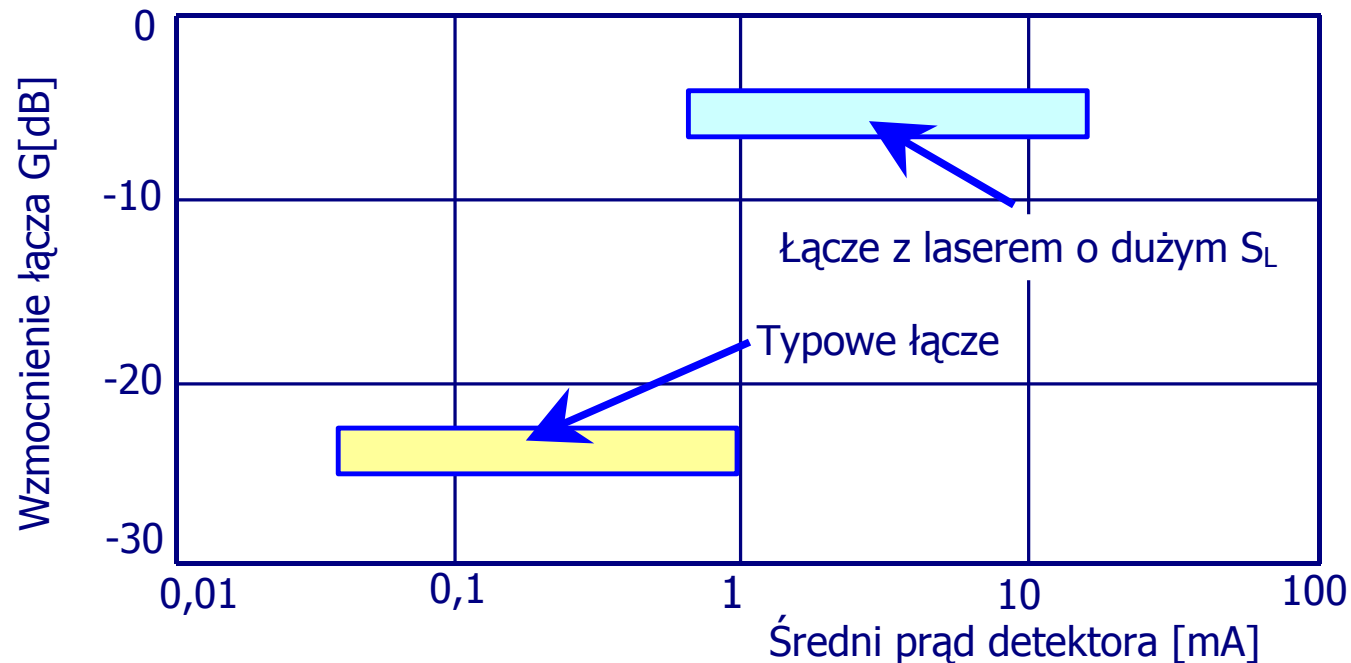
- ◆ Czulość fotodetektorów PIN, dla niedużych pasma fotodetekcji, bliska jest teoretycznej wartości $R_D = 1 \text{ A/W}$.
- ◆ Ze wzrostem szerokości pasma maleje wartość R_D i należy się spodziewać zmniejszenia całkowitego wzmacnienia G .
- ◆ Podobnie zachowują się fotodetektory typu MSM



Rys.13.4. Czulości rozmaitych fotodetektorów zależą od ich pasma pracy.

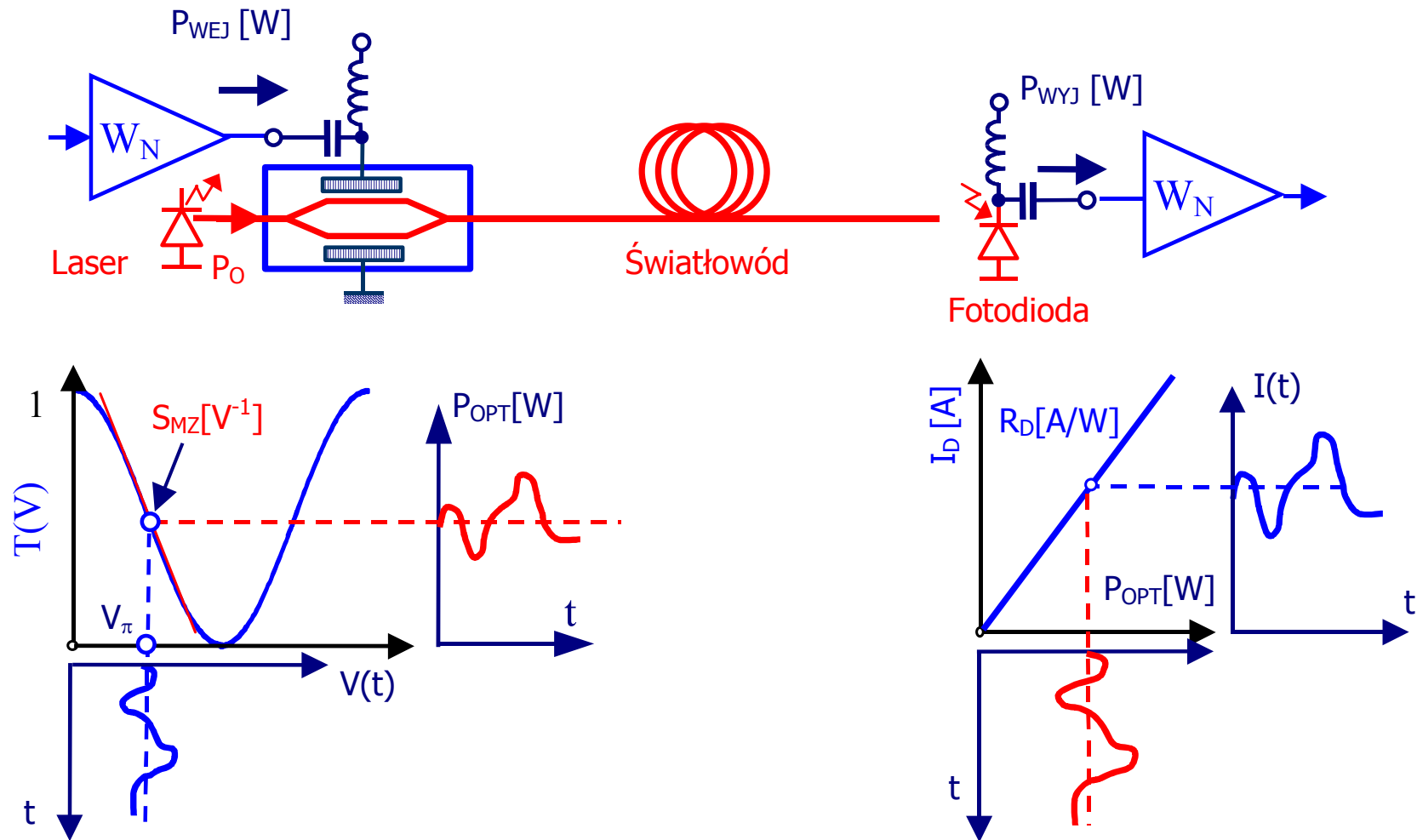
13.2. ŁĄCZA ANALOGOWE Z BEZPOŚREDNIĄ MODULACJĄ – WZMOCNIENIE

- ◆ W typowych łączach analogowych z bezpośrednią modulacją mocy optycznej lasera półprzewodnikowego wzmocnienia G są zwykle mniejsze od -20 dB.
- ◆ W specjalnych typach laserów o dużym nachyleniu S_L można uzyskać wzmocnienia większe od -10 dB.



Rys.13.5. Wartości wzmocnienia łącz analogowych typowe i dla specjalnie dobranych typów laserów

13.3. ŁĄCZA ANALOGOWE Z MODULACJĄ ZEWNETRZNĄ – STRUKTURA ŁĄCZA



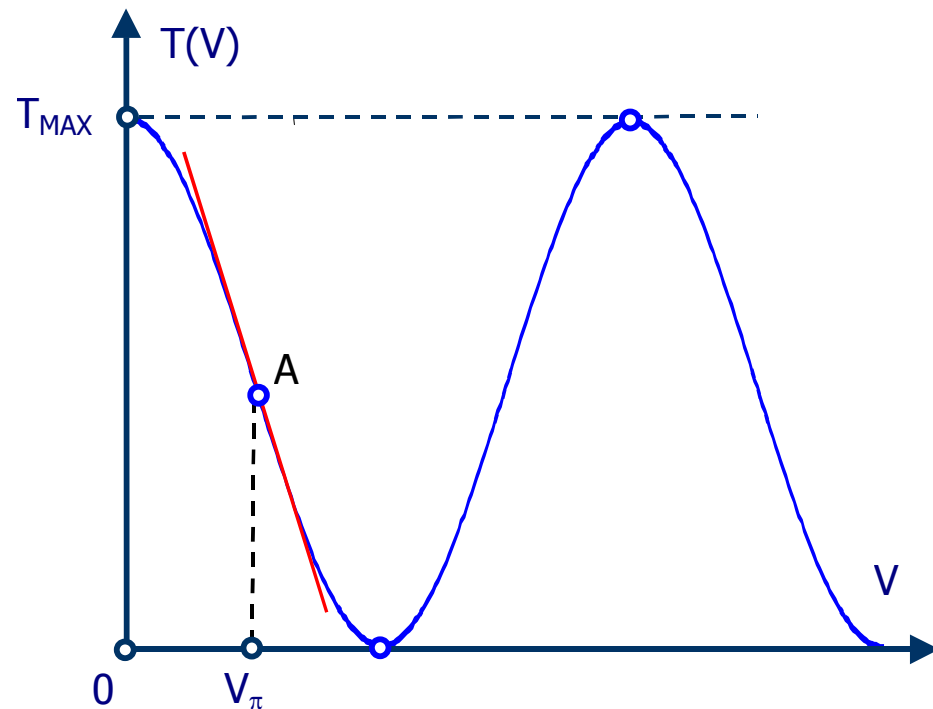
Rys.13.6. Łącze światłowodowe z zewnętrzną modulacją mocy optycznej przez modulator elektrooptyczny, oraz ilustracja procesów modulacji i detekcji.

13.3. ŁĄCZA ANALOGOWE Z MODULACJĄ ZEWNĘTRZNĄ – MODULATOR MZ (1)

- ◆ Zasada działania modulatora elektrooptycznego Mach-Zehnde'ra opisana została w Wykładzie 6. Zgodnie z podanym tam wyprowadzeniem charakterystyka transmisji mocy optycznej opisana jest następująco (V_π charakterystyczna wartość napięcia modulatora):

$$T(V) = \frac{P_{\text{OWYJ}}}{P_{\text{OWEJ}}} = \frac{T_{\text{MAX}}}{2} \left\{ 1 + \cos \left[\frac{\pi V}{2V_\pi} \right] \right\};$$

Rys.13.7. Charakterystyka transmisji mocy przez modulator elektrooptyczny w funkcji amplitudy fali modulującej. Modulator winien być wstępnie spolaryzowany.



13.3. ŁĄCZA ANALOGOWE Z MODULACJĄ ZEWNĘTRZNĄ – MODULATOR MZ (2)

- ◆ Napięcie $V = V_0 + V_{RF}$ jest sumą napięcia polaryzacji V_0 i sygnału V_{RF} .
- ◆ Maksymalna transmisja mocy optycznej $T_{MAX} < 1$, modulator ma własne straty wynikłe ze stratności światłowodów planarnych.
- ◆ W punkcie przegięcia charakterystyki $T(V)$, dla $V_0 = V_\pi$, występuje długi odcinek prostoliniowy o nachyleniu S_{MZ} :

$$S_{MZ} = \left. \frac{\partial T(V)}{\partial V} \right|_{V=V_\pi} = -\frac{\pi T_{MAX}}{4V_\pi};$$

- ◆ Transmitancja modulatora $T(V_{RF})$ dla $V_0 = V_\pi$:

$$T(V_{RF}) \cong \frac{T_{MAX}}{2} + S_{MZ} V_{RF} = T_{MAX} \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi V_{RF}}{4V_\pi} \right);$$

- ◆ Polaryzacja wstępna w p.A umożliwia pracę jako modulatora amplitudy.
- ◆ Napięcie V_{RF} może mieć przebieg sinusoidalny, bądź być sumą wielu nośnych z bocznymi wstęgami modulacji.

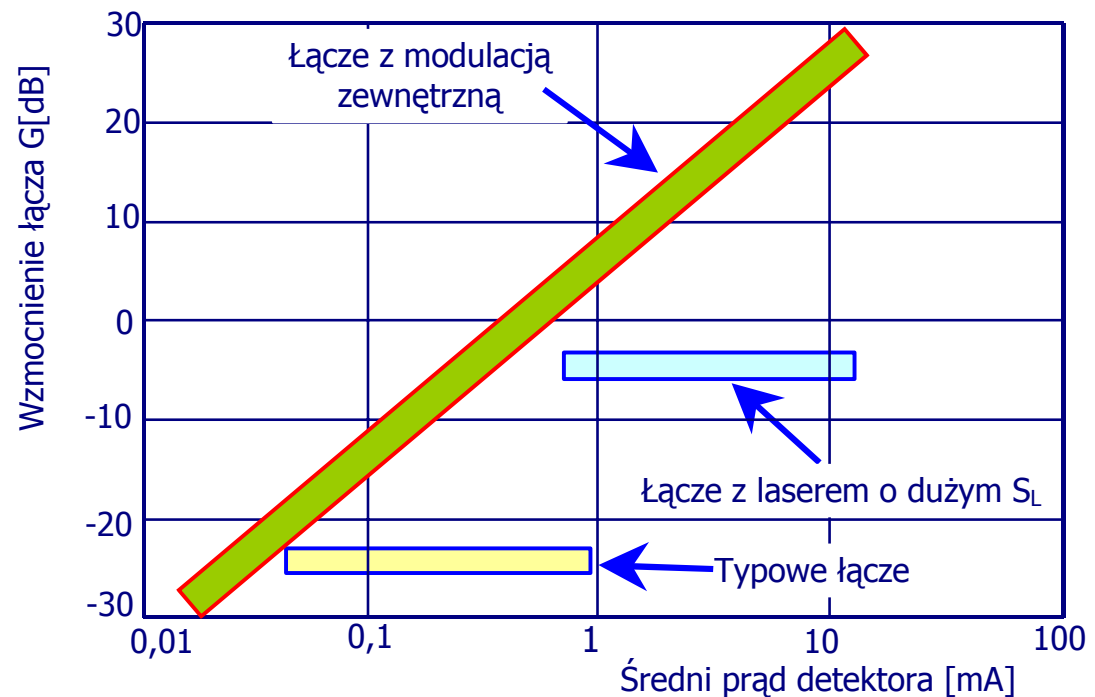
13.3. ŁĄCZA ANALOGOWE Z MODULACJĄ ZEWNĘTRZNĄ – WZMOCNIENIE

- ◆ Można zdefiniować wzmacnienie G analogicznie jak dla łącza z modulacją bezpośrednią:
- ◆ Głębokość modulacji mocy optycznej zależy od $(V_{RF}/V_{\pi})^2$.
- ◆ Ta sama amplituda V_{RF} może modulować małe, bądź duże moce optyczne P_O . A więc wzmacnienie łącza optycznego jest proporcjonalne do mocy wyjściowej lasera nadajnika.

$$G = \frac{P_{WYJ}}{P_{WEJ}} \approx \frac{I_{mD}^2}{I_{mL}^2}$$

$$G \approx S_{MZ}^2 R_D^2 \approx \frac{P_0^2}{V_{\pi}^2} R_D^2;$$

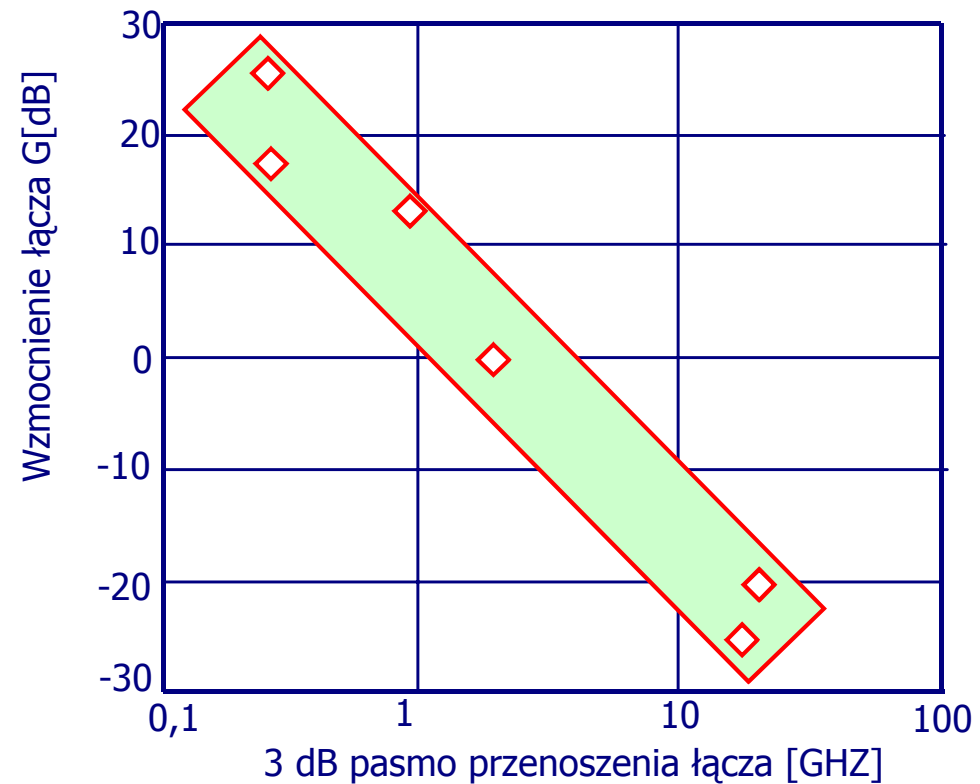
Rys.13.8. Porównanie wzmacnień łącza analogowego z bezpośrednią i zewnętrzną modulacją mocy optycznej.



13.3. ŁĄCZA ANALOGOWE Z MODULACJĄ ZEWNĘTRZNĄ – EKSPERYMENTY

- ◆ Łącza z modulacją zewnętrzną umożliwiają użycie laserów na ciele stałym Nd:YAG, o mocy optycznej kilku watów.
- ◆ Przy użyciu dużych mocy optycznych możliwym jest uzyskanie całkowitego wzmocnienia.
- ◆ Wartość wzmocnienia zależy, jak zwykle, od pasma pracy.

Rys.13.9. Najlepsze rezultaty wzmocnień eksperymentalnych łącz analogowych z laserami na ciele stałym.

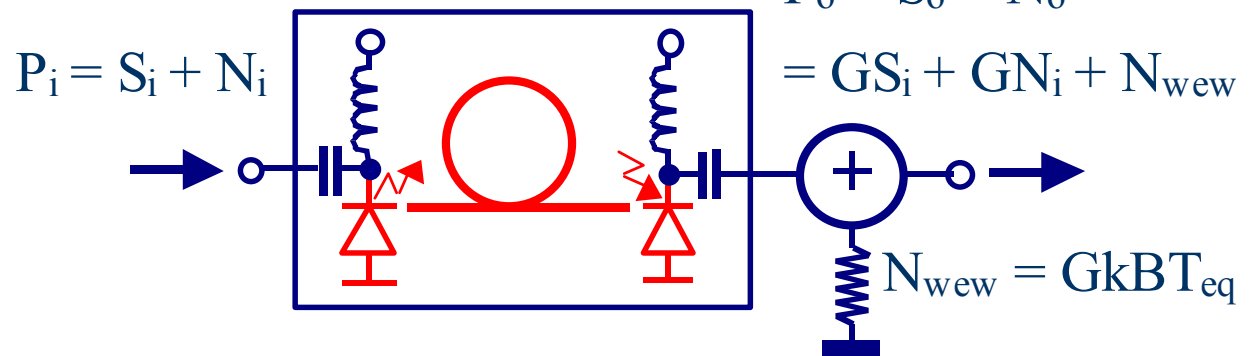


13.4. PARAMETRY ŁĄCZ ANALOGOWYCH – WSPÓLCZYNNIK SZUMÓW (1)

- ◆ Ważnym parametrem łączy analogowych jest współczynnik szumów.
- ◆ Stosunek mocy sygnału S do mocy szumu N , S/N jest miarą jakości odbieranego sygnału i ulega degradacji w procesie transmisji łączy analogowymi.
- ◆ Współczynnik szumów F łączy analogowego definiowany jest jako stosunek:

$$F = \frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \geq 1;$$

Rys.13.10. Sygnały i szum na wejściu i wyjściu łączy analogowego.



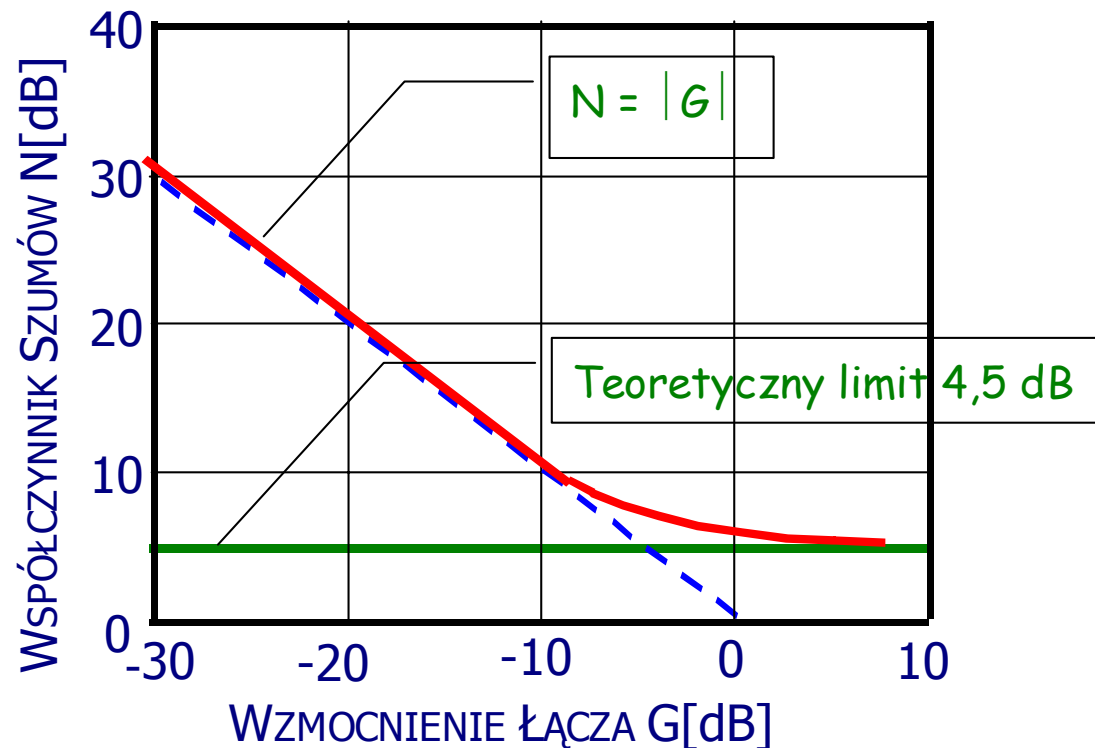
- ◆ Sygnał S_o zostaje wzmocniony:
- ◆ Moc szumu $N_i = kT_0B$; $T_0 = 290K$; zostaje także wzmocniona G razy, do niego dodaje się szum łączy:

$$S_o = S_i G;$$

$$N_o = GkB(T_0 + T_{eq});$$

13.4. PARAMETRY ŁĄCZY ANALOGOWYCH – WSPÓŁCZYNNIK SZUMÓW (2)

- ◆ Łączy z bezpośrednią modulacją mocy, o wzmocnieniach w granicach -30 dB... -5 dB zachowują się jak tłumiki, dla których współczynnik szumów równy jest wartości tłumienia.
- ◆ Wzmocnienie łączy z zewnętrzną modulacją mogą mieć wartości większe od jedności. Ze wzrostem wzmocnienia współczynnik szumów maleje do teoretycznej granicy 4,5 dB.

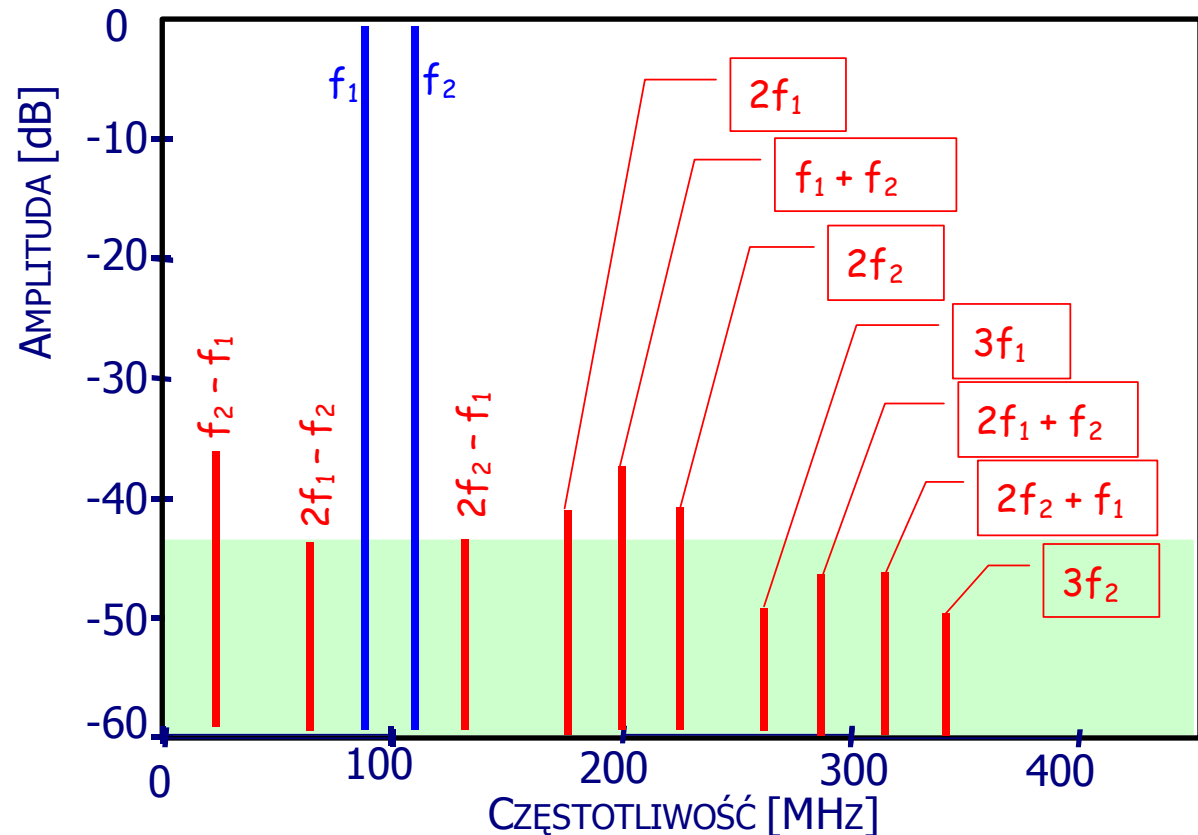


Rys.13.11. Współczynnik szumów N łączy analogowych w zależności od ich wzmocnienia G .

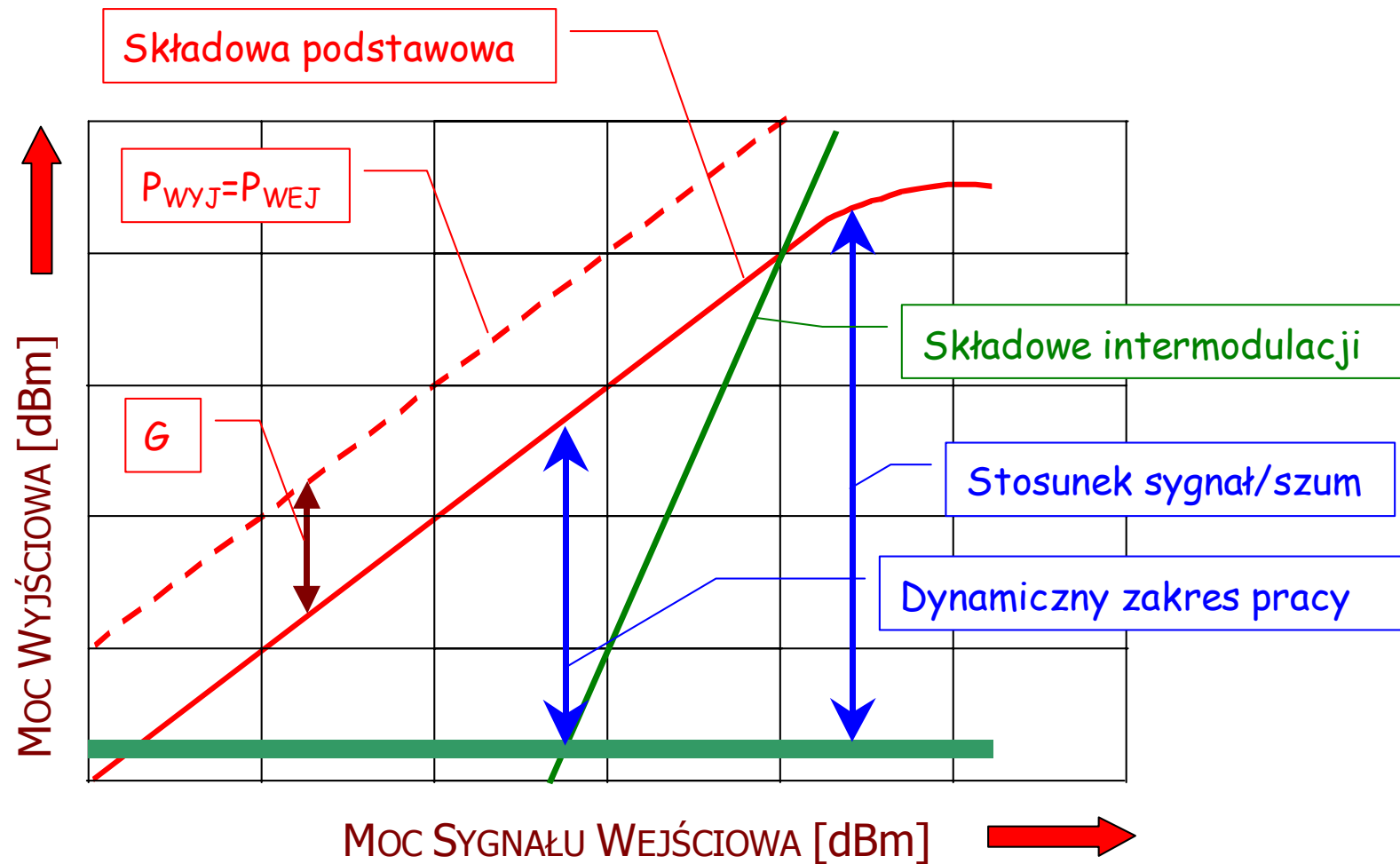
13.4. PARAMETRY ŁĄCZY... – ZNIEKSZTAŁCENIA INTERMODULACYJNE

- ◆ Procesy modulacji mocy optycznej lasera półprzewodnikowego, charakterystyka modulatora MZ, charakterystyka detekcji fotodetektora nie są idealnie liniowe. Staje się to przyczyną powstawania zniekształceń intermodulacyjnych, niepożądanych w łączach analogowych.

Rys.3.12. Charakterystyka widma sygnału wyjściowego łącza analogowego zasilanego sygnałem dwutonowym o częstotliwościach f_1 i f_2 .



13.4. PARAMETRY ŁĄCZ ANALOGOWYCH – ILUSTRACJA GRAFICZNA



Rys.13.10. Ilustracja podstawowych parametrów łączy analogowych: wzmocnienia G , stosunku sygnału do szumu i dynamicznego zakresu pracy, ograniczonego obecnością zniekształceń intermodulacyjnych.

13.4. PARAMETRY ŁĄCZ ANALOGOWYCH – PORÓWNANIE PARAMETRÓW

- ◆ Zestawiono w Tabeli najlepsze rezultaty łączy analogowych wykorzystujących technikę IM/DD dla oby typów modulacji mocy optycznej.

Parametr		Bezpośrednia modulacja	Modulacja zewnętrzna
Długość fali	nm	850, 1300, 1550	1300, 1550
Maksymalna częstotliwość modulacji	GHz	30	100
Wzmocnienie mocy łącza	dB	-5...-35	-30...+30
Współczynnik szumów	dB	20...60	4...30
Dynamiczny zakres pracy bez zniekształceń IM	dB.Hz ^{2/3}		
Standard		100...114	112
Z linearyzacją		120	130

13.5. PODSUMOWANIE

- ◆ Mimo rozwoju techniki transmisji sygnałów cyfrowych, w wielu przypadkach optyczne łącza analogowe są użytecznym narzędziem transmisji.
- ◆ Najprostszymi w realizacji są łącza analogowe z laserami półprzewodnikowymi. Wzmocnienie tego typu łącz jest dużo mniejsze od 1, powoduje to degradację stosunku sygnał/szum.
- ◆ Łącza z modulacją zewnętrzną umożliwiają użycie laserów na ciele stałym Nd:YAG, o mocy kilku watów. W rezultacie wzmocnienia łącz są większe od 1, a współczynnik szumów maleje do kilku decybeli. Wadą tego typu rozwiązań jest wysoka cena lasera na ciele stałym i modulatora elektrooptycznego.
- ◆ W łączach analogowych z multipleksacją na podnośnych typu SCM istotnym problemem stają się zniekształcenia intermodulacyjne. Aby poprawić dynamikę łącza stosuje się rozmaite techniki prowadzące do obniżenia poziomu tych zniekształceń, takie jak:
 - układy wprowadzające wstępne zniekształcenia,
 - układy ze sprzężeniem w przód.