

POLITECHNIKA LUBELSKA
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Katedra Elektroniki i Techniki Informacyjnych



mgr inż. Tomasz Bobruk

AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Optymalizacja procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w
operatorskich traktach światłowodowych

Promotor:
dr hab. inż. Andrzej Kowalski

Lublin, 2022

SPIS TREŚCI

1.	UZASADNIENIE WYBORU TEMATU BADAWCZEGO	3
2.	TEZA, CEL I ZAKRES BADAŃ.....	4
3.	STRUKTURA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ	5
4.	WYNIKI BADAŃ.....	6
4.1	NORMALIZACJE, NORMY EUROPEJSKIE	6
4.1.1	<i>Zalecenia ITU-T G.957</i>	6
4.1.2	<i>Zalecenia ITU-T G.691</i>	6
4.1.3	<i>Zalecenia ITU-T G.671</i>	7
4.2	METODY PROJEKTOWANIA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH.....	8
4.2.1	<i>Linia SMF bez kompensacji</i>	8
4.2.2	<i>Linia SMF z kompensatorem DC-SMF</i>	8
4.2.3	<i>Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF</i>	9
4.2.4	<i>Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG</i>	9
4.3	ANALIZA KOSZTOWA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH	14
4.3.1	<i>Linia SMF z kompensatorem DC-SMF</i>	14
4.3.2	<i>Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF</i>	15
4.3.3	<i>Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG</i>	16
5.	PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....	17
6.	LITERATURA	19

1. UZASADNIENIE WYBORU TEMATU BADAWCZEGO

Przez lata, operatorzy telekomunikacyjni budowali sieci DWDM, które w znacznej mierze oparte są o kable światłowodowe SMF w standardzie ITU G.652 A i B [18]. Sieci te są stale rozbudowywane poprzez dołączanie linii światłowodowych SMF opartych o najnowsze standardy ITU G.652 D.

Z drugiej strony, przy dużych nakładach finansowych, operatorzy budowali systemy DWDM, które umożliwiają przenoszenie transmisji o przepływnościach do 40 Gbit/s.

Głównym ograniczeniem dla tego rodzaju transmisji jest istniejąca już infrastruktura wybudowana w oparciu o włókna w standardzie G.652 A i B [18]. Włókna te, mają relatywnie dużą dyspersję. Wymiana tych kabli na nowsze NZDSF z płaską charakterystyką dyspersji chromatycznej [19] nie jest możliwa ze względu na ogromne koszty inwestycyjne [10][13]. Światłowody te mają niższą dyspersję niż światłowody standardowe, lecz niektóre z nich posiadają większe nachylenie charakterystyki dyspersyjnej, co powoduje, że właściwe skompensowanie dyspersji w długich liniach z wykorzystaniem techniki DWDM, staje się problemem krytycznym [7].

Oczywiście, są prowadzone badania nad poszerzeniem pasma [1], których wynikiem jest już osiągnięcie transmisji dla systemów DWDM 8x40 Gbit/s i 8x54 Gbit/s na odcinku 200 km w paśmie 1310 nm [16], a z drugiej strony mamy dziś dostępne systemy koherentne z odbiorem heterodynowym [15][2][17], które umożliwiają przepływności 100 Gbit/s, 200 Gbit/s [8] czy nawet 800 Gbit/s, co sumarycznie daje przepływność rzędu nawet 4 Tbit/s, i które tolerują dyspersję na poziomie nawet 40000 ps/nm [8].

Jednakże, obserwując sytuację ekonomiczną operatorów telekomunikacyjnych oraz ciągły wzrost zapotrzebowania użytkowników na coraz szersze pasmo [5][6][3], uznałem, że niezbędnym jest, z punktu widzenia operatorów telekomunikacyjnych, minimalizacja kosztów kapitałowych oraz operacyjnych. W związku z tym, referowana rozprawa doktorska stanowi analizę metod kompensacji dyspersji chromatycznej atrakcyjnych cenowo, w tym z propozycją własnej autorskiej metody rozwiązania problemu kompensacji dyspersji chromatycznej, które mogą zaspokoić wyżej określone potrzeby przy maksymalnym wykorzystaniu istniejących i eksploatowanych sieci światłowodowych, jak również zaimplementowanych systemach DWDM.

Referowana rozprawa doktorska ma charakter wdrożeniowy i przedstawia realne scenariusze konfiguracji infrastruktury wraz z propozycją ich modyfikacji i analizą kosztów.

2. TEZA, CEL I ZAKRES BADAŃ

Referowana rozprawa doktorska bazuje na aktualnym stanie wiedzy oraz własnemu doświadczeniu inżynierskiemu, stąd postawiłem następującą tezę rozprawy:

Metodyka kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich traktach światłowodowych może być optymalizowana jako proces wielokryterialny z uwzględnieniem wypadkowego pasma transmisyjnego, tłumienności toru i nakładów finansowych.

Tak postawiona teza sprowadziła rozprawę do przedstawienia analizy sposobów poprawy pasma w oparciu o istniejącą infrastrukturę światłowodową operatorów telekomunikacyjnych, bez wymiany wszystkich istniejących kabli.

W rozprawie omówiono również metody projektowania modyfikacji istniejących traktów światłowodowych, możliwych do wykorzystania w operatorskich traktach światłowodowych, jak również przedstawiono autorskie propozycje modyfikacji infrastruktury wraz z prezentacją wyników i możliwości ich zastosowań przy jeszcze niższym koszcie inwestycyjnym.

Praca nie obejmuje dyspersji polaryzacyjnej, a skupia się jedynie na aspektach dyspersji chromatycznej.

3. STRUKTURA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Rozprawa doktorska liczy 65 stron i składa się z 8 rozdziałów. Na końcu rozprawy umiejscowiono jej bibliografię liczącą 90 pozycji literaturowych.

W rozdziale 1 przedstawiono uzasadnienie podjętej tematyki dotyczącej procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w już istniejących liniach światłowodowych wybudowanych przez operatorów telekomunikacyjnych, które nie mogą być wymienione na nowsze NZDSF z płaską charakterystyką dyspersji chromatycznej ze względu na ogromne koszty inwestycyjne.

W rozdziale 2 przedstawiono tezę, cel i zakres pracy.

W rozdziale 3 omówiono zjawisko dyspersji chromatycznej z podziałem na dyspersję materiałową i falowodową oraz z uwzględnieniem fizycznych podstaw i matematycznego opisu zjawiska. Rozdział ten zawiera również opis dyspersji całkowitej dla światłowodów wielomodowych i jednomodowych, gdzie analizowano również dyspersję dla światłowodów ze zmodyfikowaną, przesuniętą czy też płaską charakterystyką dyspersji.

W rozdziale 4 rozprawy przedstawiono opis systemów transmisji optycznej DWDM i MetroDWDM, jako systemów najczęściej wykorzystywanych w telekomunikacji, i które umożliwiają transmisję z sumaryczną przepływnością liczoną w Tbit/s.

W rozdziale 5 omówiono możliwe sposoby kompensacji dyspersji stosowane w telekomunikacji. Przedstawiono sposoby najczęściej wykorzystywane przez operatorów telekomunikacyjnych, czyli zastosowanie DC-SMF lub kompensatorów z siatką o zmiennym okresie DCG, jak również omówiono te metody, które pozostają wciąż w sferze badań (zastosowanie światłowodów fotonicznych, czy też domieszkowanie światłowodów fluorem).

Rozdział 6 dotyczy postawionej na początku pracy tezy. Przedstawiono analizę sposobów poprawy pasma w oparciu o istniejącą infrastrukturę światłowodową operatorów telekomunikacyjnych, bez wymiany wszystkich istniejących kabli. Analiza zawiera linię SMF bez kompensacji (wzór do odniesienia dla pozostałych metod), linię z kompensatorem DC-SMF, DCG, ale również propozycję autorską wymiany odcinka istniejącej linii SMF na kabel DC-SMF na skutek zdarzeń występujących na infrastrukturze operatorów, w ramach których operator nie ponosi dodatkowych kosztów inwestycyjnych.

W rozdziale 7 przedstawiono wyniki analiz i wnioski.

Rozdział 8 jest przeglądem literaturowym.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1 NORMALIZACJE, NORMY EUROPEJSKIE

Dopuszczalne wartości dyspersji chromatycznej dla konkretnego systemu DWDM powinny być podane przez producenta systemu, ale można je również odczytać w zaleceniach ITU-T.

4.1.1 Zalecenia ITU-T G.957

Dla systemów o przepływności 2,5 Gbit/s wartość dopuszczalnej dyspersji można odczytać z zaleceń ITU-T G.957 i wynosi ona 1600 ps/nm dla górnego zakresu fal i 1200 ps/nm dla dolnego zakresu fal z przedziału 1500–1580 nm [20]. Szczegółowe dane zawiera Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Zalecenia ITU-T G.957 dla systemów 2,5 Gbit/s [20]

	Jednostka	Wartość
Sygnal cyfrowy		STM-16
Nominalna przepływność	<i>kbit/s</i>	2 488 320
Oznaczenie		L-16.2
Zakres pracy długości fali	<i>nm</i>	1500–1580
Maksymalna dyspersja dla górnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	1600
Maksymalna dyspersja dla dolnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	1200

4.1.2 Zalecenia ITU-T G.691

Podobnie jest dla systemów o przepływności 10 Gbit/s, wartość dopuszczalnej dyspersji można odczytać z zaleceń ITU-T G.691 i wynosi ona odpowiednio dla odcinka linii dalekiego zasięgu L o długości 80 km i V o długości 120 km, 1600 ps/nm i 2400 ps/nm dla górnego zakresu fal z przedziału 1530-1565 nm oraz 800 ps/nm i 1600 ps/nm dla dolnego zakresu fal we wskazanym przedziale [22].

Tabela 4.2. Zalecenia ITU-T G.691 dla systemów 10 Gbit/s [22]

	Jednostka	Wartość	Wartość
Oznaczenie		DST L-64.2/2	DST V-64.2
Zakres pracy długości fali	<i>nm</i>	1530–1565	1530–1565
Maksymalna dyspersja dla górnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	1600	2400
Maksymalna dyspersja dla dolnego zakresu długości fali	<i>ps/nm</i>	800	1600

4.1.3 Zalecenia ITU-T G.671

Zalecenie ITU-T G.671 zawiera omówienie podstawowych parametrów elementów systemów DWDM, gdzie m.in. opisane zostały parametry kompensatora dyspersji chromatycznej. Szczegółowe wartości tłumienia dla kompensowanych linii zawiera Tabela 4.3, natomiast Tabela 4.4 przedstawia wartości dyspersji.

Tabela 4.3. Wartości tłumienia dla kompensowanych linii według zaleceń ITU-T G.671 [21]

	Długość kompensowanej linii	Maksymalne tłumienie
	<i>km</i>	<i>dB</i>
5.11.5	20	3,6
5.11.7	40	5,5
5.11.9	60	7,5
5.11.11	80	9,5
5.11.13	100	11,5
5.11.15	120	13,5

Tabela 4.4. Wartości dyspersji dla kompensowanych linii według zaleceń ITU-T G.671 [21]

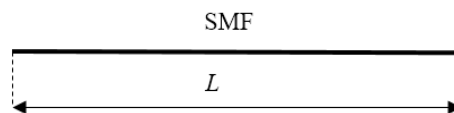
	Długość kompensowanej linii	Maksymalna dyspersja	Minimalna dyspersja
	<i>km</i>	<i>ps/nm</i>	<i>ps/nm</i>
5.12.1	10	-168	-178
5.12.2	20	-337	-356
5.12.3	30	-506	-533
5.12.4	40	-675	-711
5.12.5	50	-844	-888
5.12.6	60	-1013	-1066
5.12.7	70	-1182	-1244
5.12.8	80	-1351	-1421

4.2 METODY PROJEKTOWANIA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH

W rozprawie przedstawiono typowe możliwości optymalizacji procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich liniach telekomunikacyjnych, które umożliwiają poprawę pasma bez wymiany wszystkich istniejących kabli.

4.2.1 Linia SMF bez kompensacji

Pierwszy wariant dotyczy istniejącej linii telekomunikacyjnej o długości L wybudowanej w oparciu o włókna światłowodowe w standardzie G.652 A



Rys. 4.1. Linia SMF

Tłumienie tej linii określone jest wzorem:

$$A = \alpha \cdot L, \quad (4.1)$$

gdzie α – tłumienność linii SMF [dB/km], L – długość linii SMF [km]

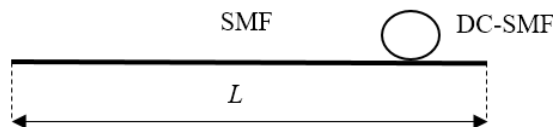
natomiast dyspersja całkowita linii SMF wynosi:

$$d = D \cdot L, \quad (4.2)$$

gdzie D – dyspersja jednostkowa linii SMF [ps/nm·km]

4.2.2 Linia SMF z kompensatorem DC-SMF

W tym modelu do kompensacji linii SMF wykorzystano światłowód DC-SMF, który został nawinięty na bęben i umieszczony w węźle telekomunikacyjnym.



Rys. 4.2. Linia SMF z kompensatorem DC-SMF

Tłumienie takiej linii wynosi:

$$A = \alpha \cdot L + \alpha_c \cdot L_c, \quad (4.3)$$

gdzie α_c – tłumienność kompensatora [dB/km], L_c – długość kompensatora [km],

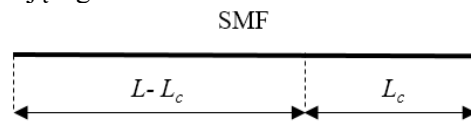
natomiast dyspersja całkowita linii z zastosowanym kompensatorem DCF-SMF wynosi:

$$d = D \cdot L + D_c \cdot L_c, \quad (4.4)$$

gdzie D_c – dyspersja jednostkowa kompensatora [ps/nm·km]

4.2.3 Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF

Model ten przedstawia linię SMF o długości $L-L_c$, w której założono wymianę odcinka istniejącego kabla SMF na kabel DC-SMF o długości L_c



Rys. 4.3. Linia SMF z wymienionym odcinkiem kabla na DC-SMF

Wówczas tłumienie takiej linii będzie wynosiło:

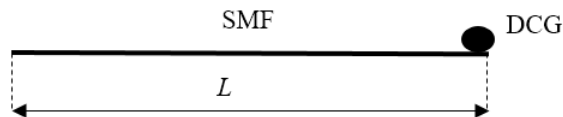
$$A = \alpha \cdot (L - L_c) + \alpha_c \cdot L_c, \quad (4.5)$$

a całkowita dyspersja linii:

$$d = D \cdot (L - L_c) + D_c \cdot L_c. \quad (4.6)$$

4.2.4 Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG

W tym modelu do kompensacji dyspersji wykorzystano DCG, który został umieszczony na końcu linii



Rys. 4.4. Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG

Tłumienie takiej linii będzie wynosiło:

$$A = \alpha \cdot L + A_B, \quad (4.7)$$

gdzie A_B – tłumienie DCG [dB],

a dyspersja całkowita linii wynosi:

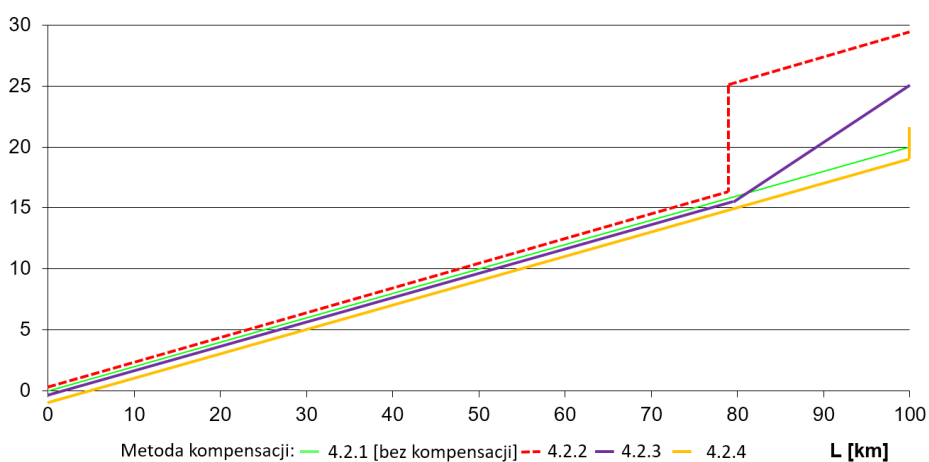
$$d = D \cdot L + d_B, \quad (4.8)$$

gdzie d_B oznacza dyspersję DCG [ps/nm]

Przykład I

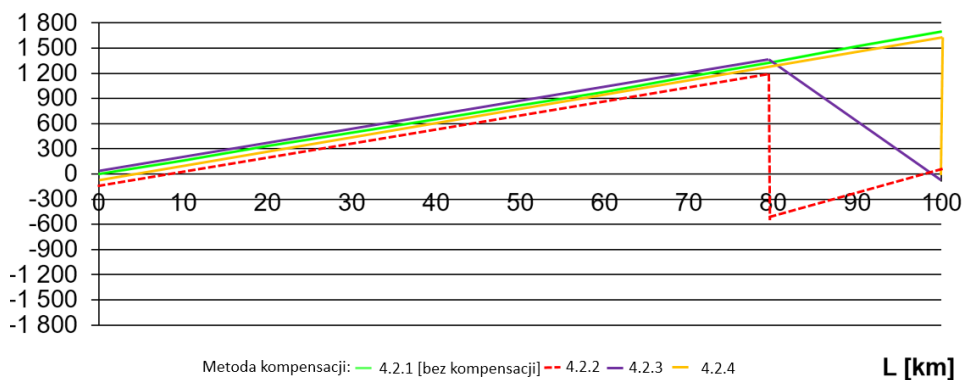
Poniżej, na rysunkach 4.5 i 4.6 przedstawiono wykresy i obliczone wartości A i d dla systemu niekoherentnego na podstawie przedstawionych w pkt. 4.2 metod modyfikacji istniejących traktów światłowodowych, przy długości fali 1550.92 nm dla przykładowej linii o długości 100 km. Do kalkulacji przyjęto następujące wartości $\alpha = 0,2$ dB/km, $\alpha_c = 0,5$ dB/km, $D = 17$ ps/nm·km, $D_c = -90$ ps/nm·km, $A_B = 2$ dB, $d_B = -1700$ ps/nm [4]

A [dB]



Rys. 4.5. Wykres zależności tłumienia od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji [4]

d [ps/nm]



Rys. 4.6. Wykres zależności dyspersji całkowitej linii od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji [4]

Uzyskane wyniki wskazują, że nawet dla systemów niekoherentnych o długości linii do 100 km praktycznie kompensacja nie jest wymagana, ponieważ zgodnie z zaleceniami ITU-T określonymi w pkt. 4.1.1 i 4.1.2, niewiele odbiegają one od granicznych wartości.

Jednakże, w zależności od zastosowanych elementów systemu DWDM, np. biorąc pod uwagę oferowane przez dostawców elementy systemów DWDM dla transmisji 10 Gbit/s [9] są w stanie poradzić sobie z dyspersją na poziomie kilkuset ps/nm (np. od -200 do +300 ps/nm, czy od +100 do +800 ps/nm), stąd w takich przypadkach zastosowanie metod modyfikacji istniejących traktów opisanych w pkt. 4.2.2 – 4.2.4 jest niezbędne nawet dla linii o długości 100 km. Idąc dalej, przyjmując założenie konieczności kompensacji, przedstawione na rysunku 4.6 wartości dyspersji chromatycznej dotyczą jednokanałowego systemu DWDM. Stosowane u operatorów telekomunikacyjnych systemy posiadają wiele kanałów. Stosując kompensację dyspersji wyliczoną pod kątem jednej długości fali (w rozpatrywanym przypadku jest to 1550,92 nm), na pozostałych kanałach mamy niepełną kompensację. W Tabeli 4.5 przedstawiono wyliczone wartości dyspersji chromatycznej dla czterokanałowego systemu DWDM o długościach fal 1549,32 nm, 1550,12 nm, 1550,92 nm i 1551,72 nm. Do wyliczeń przyjęto wartości z Przykładu I oraz dodatkowo, przyjęto, że dyspersja chromatyczna w poszczególnych kanałach linii różni się o 0,06 ps/nm·km na każde 0,8 nm.

Tabela 4.5. Zmiany wartości dyspersji chromatycznej dla poszczególnych kanałów DWDM

Metoda kompensacji	Dyspersja chromatyczna d [ps/nm]			
	1549,32 nm	1550,12 nm	1550,92 nm	1551,72 nm
4.2.1 [linia bez kompensacji]	1688	1694	1700	1706
4.2.2	-11,2	-5,2	0,8	6,8
4.2.3	-10,32	-5,27	-0,23	4,82
4.2.4	-12	-6	0	6

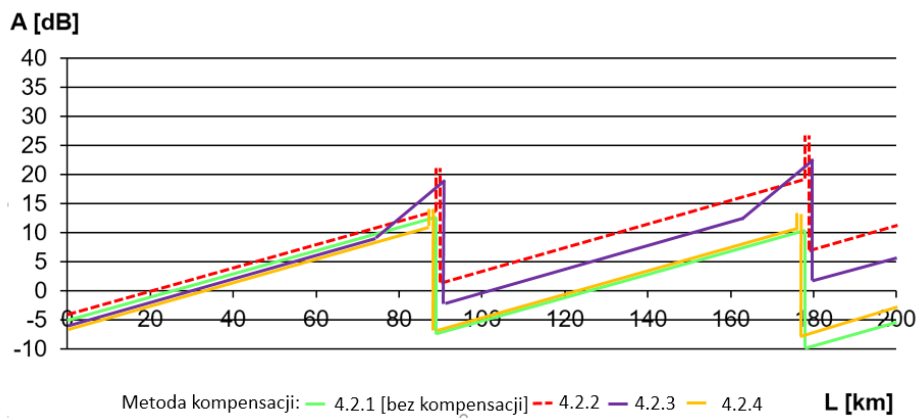
Przykład II

Kolejny przykład dotyczy linii o długości 200 km. Do wyliczeń przyjęto parametry jak w Przykładzie I, przy czym zmieniono długość linii na 200km. Dodatkowo, z uwagi na konieczność uwzględnienia wzmacniaczy optycznych, założono moc nadawania 5 dBm, czułość odbioru sygnału dla odbiornika wynosi -18 dBm, moc przesterowania tego odbiornika -10 dBm.

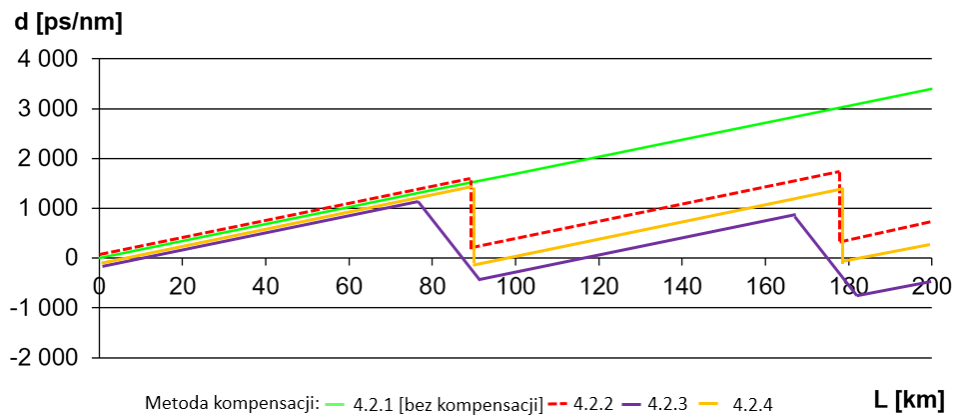
Całkowita wartość dyspersji dla zakładanej linii wynosi 3400 ps/nm·km, co oznacza, że dla systemów koherentnych kompensacja nie jest wymagana, ale dla systemów niekoherentnych bez zastosowania kompensatorów maksymalny zasięg tego systemu wynosi 94 km. Skoro dopuszczalna wartość dyspersji dla

tego systemu wynosi $1600 \text{ ps/nm}\cdot\text{km}$, stąd niezbędnym jest kompensacja dyspersji chromatycznej. Na podstawie wyliczeń, zastosowano w dwóch miejscach metody modyfikacji traktów opisane w pkt. 4.2, odpowiednio na 90 km i 180 km.

Całkowite tłumienie wnoszone przez linię 200 km wraz z kompensatorami wynosi 57 dB, co oznacza, że moc na wejściu odbiornika wynosi -52 dBm. Otrzymana wartość jest 34 dB poniżej czułości odbiornika. Uwzględniając przesterowanie odbiornika, do linii dodano dwa wzmacniacze o mocy 20 dB. Na rysunku 4.7 i 4.8 przedstawiono wykresy i obliczone wartości A i d dla tej linii.



Rys. 4.7. Wykres zależności tłumienia od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji



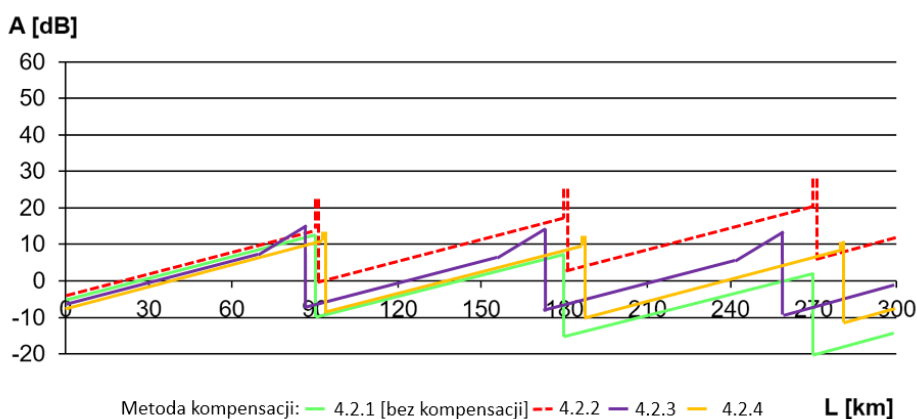
Rys. 4.8. Wykres zależności dyspersji całkowitej linii od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji

Przykład III

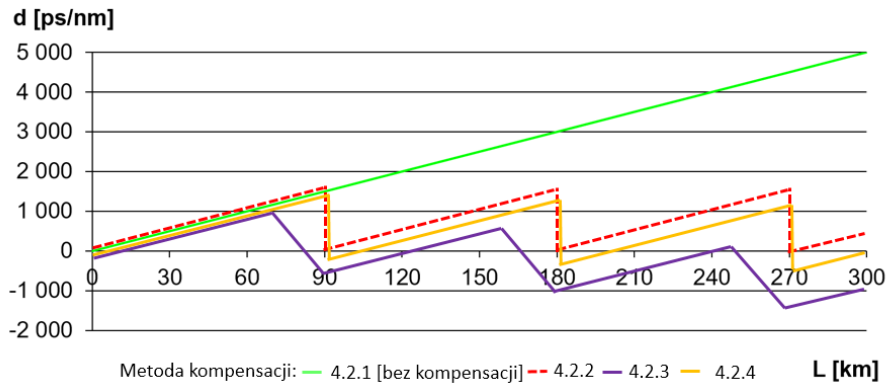
W tym przykładzie rozważono jeszcze dłuższą linię o długości 300 km. Wyliczenia oparto o te same parametry, które przyjęto w przykładzie I oraz w przykładzie II w zakresie wzmacniaczy systemu.

Całkowita wartość dyspersji przy założonych parametrach dla linii 300 km wynosi 5100 ps/nm·km, a więc podobnie jak w Przykładzie II, dla systemów koherentnych kompensacja nie jest wymagana, ale dla systemów niekoherentnych bez kompensacji dyspersji maksymalny zasięg tego systemu wynosi również 94 km. Stąd, zastosowano w trzech miejscach metody modyfikacji traktów opisane w pkt. 4.2, odpowiednio na 90 km, 180 km i 270 km.

Całkowite tłumienie wnoszone przez linię 300 km wraz z kompensatorami wynosi 85,5 dB, co oznacza, że moc na wejściu odbiornika wynosi -80,5 dBm. Otrzymana wartość jest 62,5 dB poniżej czułości odbiornika. Uwzględniając przesterowanie odbiornika, do linii dodano trzy wzmacniacze o mocy 22 dB. Na rysunku 4.9 i 4.10 przedstawiono wykresy i obliczone wartości A i d dla tej linii.



Rys. 4.9. Wykres zależności tłumienia od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji



Rys. 4.10. Wykres zależności dyspersji całkowitej linii od długości linii światłowodowej z uwzględnieniem kompensatora dyspersji

4.3 ANALIZA KOSZTOWA MODYFIKACJI ISTNIEJĄCYCH TRAKTÓW OPTYCZNYCH

Referowana rozprawa doktorska zawiera przykładowe analizy kosztowe proponowanych w pkt. 4.2 modyfikacji istniejących traktów optycznych dla systemów niekoherentnych, z uwzględnieniem aktualnych kosztów budowy kabli światłowodowych i elementów kompensujących dyspersję chromatyczną dostępnych na rynku. Koszty przyjęte w analizie są aktualne na czas pisania przedmiotowej rozprawy.

4.3.1 Linia SMF z kompensatorem DC-SMF

Kompensator DC-SMF prezentowany w pkt. 4.2.2 to najczęściej wykorzystywany sposób kompensacji dyspersji chromatycznej przez operatorów telekomunikacyjnych. Jest to światłowód DCF-SMF nawinięty najczęściej na bęben i opakowany w dyskretne elementy rackowe wysokości 1U, które umieszcza się w szafach telekomunikacyjnych w punktach węzłowych.

Rynek aktualnie prezentuje najwięcej takich rozwiązań. Charakteryzują się one niską tłumiennością oraz szerokim spektralnym zakresem pracy. Producenci standardowo oferują kompensatory z gradacją co 10 km kompensowanej linii [11]. Możliwe są również do wykonania kompensatory DC-SMF na konkretnie zmierzoną długość linii.

Ceny uzależnione są od kompensowanego dystansu, czyli od wartości dyspersji jaka ma być skompensowana. Na podstawie uśrednionych ofert kształtują się one na poziomie od kilku do kilkunastu tysięcy złotych [14].

Przedstawiona modyfikacja traktu w pkt. 4.2.2 sprowadza się do zastosowania w punkcie węzłowym wyżej opisanych elementów, czyli koszt

kompensacji w Przykładzie I przyjmuje się na poziomie kilku tysięcy złotych, natomiast w Przykładzie II jest to dwukrotność wartości z Przykładu I i analogicznie w Przykładzie III jest to trzykrotność wartości z Przykładu I.

4.3.2 Linia SMF z wymienionym odcinkiem linii SMF z kablem DC-SMF

Modyfikacja ta zakłada wymianę odcinka linii SMF o długości $L-L_c$, na kabel DC-SMF o długości L_c . W analizowanym Przykładzie I, przy przyjętych parametrach i kompensacji linii o długości 100 km, wymianie podlega odcinek linii SMF o długości 16 km.

Analiza kosztowa sprowadza się do dwóch czynników, kosztu kabla DC-SMF oraz kosztu wymiany kabla zlokalizowanego w kanalizacji teletechnicznej lub rurociągu kablowym.

Do analizy przyjmuje się koszt kabla światłowodowego DC-SMF na poziomie 2 tys. zł za kilometr, adekwatnie do kosztu typowego kabla telekomunikacyjnego o profilu 24J. Wymiana kabla światłowodowego uzależniona jest od rodzaju kanalizacji, w której jest zlokalizowany (kanalizacja pierwotna w miastach lub rurociągi poza miastami) i od profilu kabla (ilość włókien do spawania), ale dla analizy przyjęto, że kształtuje się ona na poziomie kilku tysięcy złotych za kilometr (ok. 7 tys. zł za km). Koszt wymiany odcinka linii SMF w analizowanym Przykładzie I wynosi ok. 140 tys. zł, natomiast w Przykładach II i III, odpowiednio dwu- i trzykrotność wartości z Przykładu I.

Przedstawiony model może mieć zupełnie inny obraz analizy kosztowej jeżeli operator telekomunikacyjny dokona wymiany kabla w sytuacji, kiedy zewnętrzne czynniki tj. np. przebudowa linii światłowodowej z uwagi na przebudowę infrastruktury drogowej lub konieczność modernizacji linii z uwagi na awarię, wymuszają wymianę kabla. Wówczas koszt kompensacji dyspersji chromatycznej w takim modelu jest bliski zeru.

Przyjmuje się, że koszt kabla DC-SMF jest porównywalny z kosztem typowego kabla SMF stosowanego w sieci przez operatorów, czyli wykorzystując daną sytuację uzależnioną od czynników zewnętrznych możemy w łatwy i bezkosztowy sposób wykonać kompensację linii.

Taka sama korzyść powstanie w sytuacji, kiedy operator będzie zobowiązany do przeniesienia węzła do innej lokalizacji i będzie się to wiązało z dobudowaniem nowego fragmentu linii światłowodowej SMF. Wówczas również można zabudować kabel DC-SMF kompensując chociaż w części dyspersję chromatyczną linii. W tej sytuacji, podobnie jak przy czynnikach zewnętrznych (przebudowa, awaria) koszt kompensacji dyspersji z punktu widzenia operatora telekomunikacyjnego jest bliski zeru.

4.3.3 Linia SMF z dołączonym na końcu linii kompensatorem DCG

Kompensator DCG prezentowany w pkt. 4.2.4 to rzadziej stosowany sposób kompensacji dyspersji chromatycznej przez operatorów telekomunikacyjnych. Jest to dyskretny element z zastosowaną siatką Bragga umieszczony na końcu linii.

Charakteryzują się one jeszcze niższą tłumiennością, szerokim spektralnym zakresem pracy i bardzo niskimi opóźnieniami. Producenci oferują kompensatory dla typowych długości 60 km, 80 km i 100 km [12].

Ceny kompensatorów DCG również uzależnione są od kompensowanego dystansu, czyli od wartości dyspersji jaka ma być skompensowana, niemniej, na podstawie uśrednionych ofert kształtują się one na poziomie około 10 tysięcy złotych [14].

Przedstawiona w pkt. 4.2.4 metoda modyfikacji istniejących traktów sprowadza się również do zastosowania wyżej opisanego elementu czyli koszt kompensacji w przypadku analizowanej linii z Przykładu I przyjmuje się na poziomie 10 tysięcy złotych, a dla Przykładów II i III również odpowiednio dwu - i trzykrotność wartości z Przykładu I.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione wyniki analiz wskazują, że:

1. dla linii światłowodowych o długości do 100 km nie trzeba kompensować dyspersji chromatycznej. Znaczenie mają zastosowane elementy systemu DWDM, ale zgodnie z Zaleceniami ITU-T opisanymi w pkt. 4.1, wartość dyspersji chromatycznej dla linii do 100 km mieści się w granicach określonych Zaleceniami
2. dla linii światłowodowych 200 km i 300 km również nie trzeba kompensować dyspersji pod warunkiem, że operator telekomunikacyjny stosuje system detekcji koherentnej. W innym przypadku kompensacja jest niezbędna
3. dla systemów niekoherentnych wymagana jest kompensacja dla 20% długości linii
4. należy precyzyjnie mierzyć sumaryczną dyspersję dla każdej linii optycznej i dobrać metodykę kompensacji w taki sposób, aby uzyskać w szerokim zakresie odpowiednią dla danej linii telekomunikacyjnej charakterystykę dyspersji przy najniższym nakładzie finansowym.

Ponadto, posługując się metodą modyfikacji zaproponowaną w pkt. 4.2.3 można uzyskać najmniejsze tłumienie linii. Z punktu widzenia operatora telekomunikacyjnego, w sytuacji, kiedy mamy awarię na danej linii, lub przebudowę linii z uwagi na przebudowę infrastruktury drogowej, metoda 4.2.3 jest optymalną również w kontekście finansowym, ponieważ zaistniała sytuacja i tak wymusza poniesienie kosztów naprawy czy modernizacji linii. Wówczas operator, praktycznie bez dodatkowych kosztów, może dokonać zmiany typu zastosowanego na danym odcinku kabla światłowodowego, co przyniesie oczekiwaną kompensację dyspersji chromatycznej. Dodatkowo, nawet jeżeli wyżej opisane sytuacje umożliwią wymianę fragmentu linii która nie skompensuje nam w pełni dyspersji chromatycznej, należy rozważyć jej zastosowanie i dokonać analizy uzyskanej kompensacji. Może się okazać, że wymiana kilku kilometrów linii, niweluje nam dyspersję do poziomu obsługiwanego przez zastosowany system DWDM.

Podobną sytuację mamy w momencie, kiedy operator będzie musiał zmienić punkt zakończenia linii, poprzez relokację węzła, wówczas, na nowobudowanym odcinku operator powinien rozważyć zastosowanie kabla DC-SMF.

W sytuacji, kiedy nie mamy możliwości wykorzystania wyżej opisanych sytuacji, wówczas przy uwzględnieniu obecnych nakładów finansowych, najkorzystniejszym sposobem optymalizacji procesu kompensacji dyspersji chromatycznej w istniejących liniach światłowodowych jest metoda przedstawiona w pkt. 4.2.2. Kompensator DC-SMF nawinięty na bęben i umieszczony w węźle, przy obecnych cenach rynkowych na poziomie kilku

tysięcy złotych, gwarantuje skuteczną kompensację dyspersji do poziomu w okolicach 0 ps/nm.

Metoda optymalizacji przedstawiona w pkt. 4.2.3, przy pominięciu sytuacji awarii linii lub jej przebudowy, pozwala osiągać również dobre poziomy kompensacji, ale przy nieco wyższych kosztach inwestycyjnych.

Oczywiście, przedstawione metody kompensacji dyspersji, nie są w stanie kształtować charakterystyki dyspersyjnej linii w całym dostępnym paśmie, co jest szczególnie ważne w systemach DWDM. Nie korygują one dyspersji równomiernie, korygują ją jedynie dla określonej długości, podczas gdy długości fali sąsiadujące będą nadmiernie skompensowane lub niedostatecznie skompensowane [7].

Powyższe wykazuje, że metodyka kompensacji dyspersji chromatycznej w operatorskich traktach światłowodowych może być optymalizowana jako proces wielokryterialny, z uwzględnieniem wypadkowego pasma transmisyjnego, tłumienności toru i nakładów finansowych, a właściwe zarządzanie dyspersją linii jest procesem jej równoważenia za pomocą dodatniej i ujemnej dyspersji wzdłuż długości linii, w całym interesującym nas zakresie widma tak, aby całkowita wartość dyspersji była bliska zeru lub mieściła się w z góry określonych granicach.

Oznacza to, że cel pracy został zrealizowany, a postawiona teza została udowodniona.

6. LITERATURA

- [1] Abass A.K., Ali M.H., Tahhan S.R., *Characteristics of dispersion compensation for 32 channels at 40 Gb/s under different techniques*, Journal of Optical Communications, 41 (1), November 2017, pp. 57-65
- [2] Ajayi O. T., Ayeni A.A., Ibrionke E. S., Onidare S.O., Tiamiyu O. A., *Optical dispersion compensation using different modulation formats*, Journal of Engineering and Technology, Vol.15 No.2, Maj 2021
- [3] Al-Askary A. J., Hammadi A. M., Mohsen D. E., *WDM and DWDM based RoF System in Fiber Optic Communication Systems: International Journal of Communication Networks and Information Security*, Kohat Tom 13, April 2021, 22-32
- [4] Bobruk, T., *Chromatic dispersion compensation in existing fiber optic telecommunication lines with the growing bit rates needs od DWDM system*, Informatyka, Automatyka, Pomiary W Gospodarce I Ochronie Srodowiska, 11(4), 38-41. <https://doi.org/10.35784/iapgos.280>, grudzień 2021
- [5] Cavaliere F., Contreras L.M., Lovanna P., Stracca S., Ubaldi F., Valllosera Gemma: *Network Convergence in 5G Transport*, Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC), April 2019
- [6] Cavaliere F., Giorgi L., Potí L., *Transmission and switching technologies for 5G transport networks*, 2018 IEEE Optical Interconnects Conference (OI), 4-6 June 2018
- [7] Drabik Z., Koper Z., *Wyzwania dla sieci optycznej TPSA stawiane przez technikę transmisji 10Gbit/s*. Researchgate 1/2003, 7–8.
- [8] Karta katalogowa elementu systemu koherentnego DWDM, luty 2022
- [9] Karty katalogowe elementów systemu niekoherentnego DWDM, luty 2022
- [10] Karta katalogowa kabla NZDSF, styczeń 2022
- [11] Karty katalogowe modułów DCF kompensacji dyspersji chromatycznej, styczeń 2022
- [12] Karty katalogowe modułów DCG kompensacji dyspersji chromatycznej, styczeń 2022
- [13] Oferta cenowa kabla NZDSF, styczeń 2022
- [14] Oferty cenowe modułów kompensacji dyspersji chromatycznej, styczeń 2022
- [15] Siuzdak J., *Wstęp do współczesnej telekomunikacji światłowodowej*, WKŁ, Warszawa, 1997
- [16] Turkiewicz J., *Transmisja i przetwarzanie sygnałów optycznych o wysokich przepływnościach wykorzystująca półprzewodnikowe*

wzmacniacze optyczne, Politechnika Warszawska, ISSN 0137-2343, z.192, wrzesień 2013

- [17] Yabai H., *Long-distance telecom-fiber transfer of a radio-frequency reference for radio astronomy*, *Optica*, vol. 5, no. 2, pp. 138–146, February 2018
- [18] *Zalecenia ITU-T G.652, Characteristics of a single-mode optical fibre and cable*, 03/2003
- [19] *Zalecenia ITU-T G.655, Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre and cable*, 03/2003
- [20] *Zalecenie ITU-T G.957, Optical interfaces for equipments and systems relating to the synchronous digital hierarchy*, 2006
- [21] *Zalecenia ITU-T G.671, Transmission characteristics of optical components and subsystems*, 2019
- [22] *Zalecenie ITU-T G.691, Optical interfaces for signal channel STM-64 and other SDH systems with optical*, 2006