

České vysoké učení technické v Praze

---

Fakulta elektrotechnická

Katedra radioelektroniky



## Diplomová práce

Dálkové vysokokapacitní podmořské optické spoje

Long-haul High-capacity Undersea Optical Traces

Praha, Srpen 2020

Vypracoval: Bc. Vojtěch Horný

Vedoucí práce: Ing. Michal Lucki, Ph.D.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 14. srpna 2020

.....

Podpis

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Horný** Jméno: **Vojtěch** Osobní číslo: **457075**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**  
Studijní program: **Elektronika a komunikace**  
Specializace: **Audiovizuální technika a zpracování signálů**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Dálkové vysokokapacitní podmořské optické spoje**

Název diplomové práce anglicky:

**Long-haul High-capacity Undersea Optical Traces**

Pokyny pro vypracování:

1. Vytvořte simulační model podmořského optického spoje mezi Evropou a Severní Amerikou, hlavním kritériem je úspěšný příjem optického signálu na vzdálenosti větší než 5000 km a přenosová kapacita min. 500 Mbit/s.
2. Prozkoumejte možnost dosažení požadovaných parametrů vhodnou volbou řešení pro zpracování signálu: použití vinového multiplexu, modulace, regenerace optického signálu.
3. Simulace provádějte v programu RSoft OptSim, kritériem kvality signálu je: BER, OSNR.
4. Simulační model rozšířte o další mezikontinentální optické trasy, vytvořte topologii, která odpovídá realitě a respektuje normy ITU, vytvořený model optimalizujte z hlediska max. dosažitelné přenosové kapacity.

Seznam doporučené literatury:

- [1] S. Ten et al.: Ultra-low loss, ultra-large Aeff optical fibers for undersea networks, OECC, Japan, 2018.
- [2] L. Garrett et al.: Design of global submarine networks, Journal of Optical Communications and Networking, Vol.10, No.2, 2018.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Michal Lucki, Ph.D., katedra telekomunikační techniky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **31.01.2020** Termín odevzdání diplomové práce: **14.08.2020**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

Ing. Michal Lucki, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Josef Dobeš, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústav/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Abstrakt

Předmětem této práce je simulace vysokokapacitních podmořských optických spojů v prostředí OptSim. V práci je kladen důraz na potlačení vnějších fyzikálních vlivů, které vedou ke zvýšení chybovosti přenosu. Rovněž jsou hledány a hodnoceny postupy, jež by přispěly ke zvýšení rychlosti a kvality datového toku optickým spojem.

**Klíčová slova:** podmořské optické spoje, vysokokapacitní spoj, OptSim, DWDM

## Abstract

The subject of this thesis is the simulation of high-capacity undersea optical connections using the OptSim environment. The work places emphasis on the suppression of external physical effects which lead to the increase in bit error rate. Furthermore, the work looks for and evaluates procedures which could contribute to the increase of the speed and quality of data transmission through the optical connection.

**Keywords:** undersea optical traces, ultra long haul optical traces, OptSim, DWDM

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Michal Lucki, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady a vstřícný přístup. Poděkování patří také mojí rodině, která mě podporovala během celého studia.



# Obsah

Obsah .....	6
Seznam obrázků .....	7
Seznam grafů.....	8
Seznam tabulek .....	9
Seznam zkratek .....	9
1. Úvod .....	10
2. Aktuální stav problematiky.....	11
2.1 Podmořské optické přenosové systémy.....	12
2.2 Nežádoucí jevy ovlivňující přenosový systém .....	13
2.2.1 Útlum vlákna .....	13
2.2.2 Disperze.....	14
2.2.3 Čtyřlenné směšování (FWM).....	17
2.3 Modulační formáty .....	18
3. Simulační prostředí a měřené parametry.....	19
3.1 BER .....	19
3.2 OSNR.....	19
3.3 Oko rozhodnutí .....	20
3.4 Q-faktor .....	21
4. Simulace a výsledky.....	22
4.1 Simulace kompenzace disperze .....	22
4.2 Simulace WDM systému.....	25
4.3 Simulace DWDM systému .....	29
4.4. Simulace vysokokapacitních DWDM systémů .....	38
5. Závěr.....	52
Zdroje.....	53



# Seznam obrázků

Obrázek č. 1 – Mapa podmořských optických spojů [8].....	11
Obrázek č. 2 – Závislost útlumu SMF vlákna na vlnové délce [5].....	14
Obrázek č. 3 – Závislost disperze na vlnové délce pro různé typy vláken [6].....	16
Obrázek č. 4 – Znázornění nově vzniklé intermodulační složky (modrá barva) [7] .....	17
Obrázek č. 5 – Ukázka vlivu FWM na spektrum signálu .....	18
Obrázek č. 6 – Diagramy oka rozhodnutí, na levé straně je signál ovlivněn vlivem disperze, na pravé straně se nachází ideální signál s téměř nulovou chybovostí .....	20
Obrázek č. 7 – Graf závislosti mezi BER a Q-faktorem [9].....	21
Obrázek č. 8 – Schémata jednotlivých typů disperzní kompenzace v prostředí OptSim.....	22
Obrázek č. 9 – Simulační schéma topologie přenosového systému .....	23
Obrázek č. 10 – Diagram oka rozhodnutí pro post-kompenzaci pomocí FBG pro celkovou délku 2400 km, vlevo se nachází diagram pro délku vlákna 80 km, vpravo pro 120 km .....	24
Obrázek č. 11 – Simulační schéma topologie 10Gb/s WDM systému.....	26
Obrázek č. 12 – Vstupní a výstupní spektrum WDM systému délky 4000 km.....	27
Obrázek č. 13 – Topologie 160 Gb/s DWDM systému .....	29
Obrázek č. 14 – Schéma modulů TX16 (vlevo) a RX16 (vpravo).....	29
Obrázek č. 15 – Vstupní spektrum pro DWDM systém délky 1600 km s NZDSF vláknem .....	34
Obrázek č. 16 – Výstupní spektrum pro DWDM systém délky 1600 km s NZDSF vláknem .....	34
Obrázek č. 17 – Diagram oka pro kanálovou rozteč 100 GHz (vlevo) a 50 GHz (vpravo), kanál 14 .....	37
Obrázek č. 18 – Diagram oka pro kanálovou rozteč 25 GHz (vlevo) a 12,5 GHz (vpravo), kanál 14 .....	37
Obrázek č. 19 – Topologie 960Gb/s DWDM systému .....	38
Obrázek č. 20 – Vstupní spektrum 960Gb/s DWDM systému délky 800 km.....	39
Obrázek č. 21 – Výstupní spektrum 960Gb/s DWDM systému délky 800 km .....	39
Obrázek č. 22 – Schéma RZ-DQPSK vysílače .....	41
Obrázek č. 23 – Schéma RZ-DQPSK modulátoru .....	41
Obrázek č. 24 – Schéma 640Gb/s DWDM systému založenou na RZ-DQPSK modulaci .....	42
Obrázek č. 25 – Schéma PM-QPSK vysílače .....	48
Obrázek č. 26 – Schéma bloku polmux_qpsk1 .....	49
Obrázek č. 27 – Schéma topologie 700 Gb/s PM-QPSK systému .....	49
Obrázek č. 28 – Vstupní spektrum 700Gb/s PM-QPSK systému délky 1600 km.....	50
Obrázek č. 29 – Výstupní spektrum 700Gb/s PM-QPSK systému délky 1600 km .....	50

# Seznam grafů

Graf č. 1 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro optický spoj délky 4800 km, byla použita post-kompenzace pomocí FBG.....	25
Graf č. 2 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu koncového předzesilovače pro WDM systém ...	27
Graf č. 3 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro WDM systém délky 4000 km.....	28
Graf č. 4 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro DWDM systém délky 800 km.....	30
Graf č. 5 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro DWDM systém délky 1600 km.....	31
Graf č. 6 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu předzesilovače pro DWDM systém délky 1600 km.....	32
Graf č. 7 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro DWDM systém délky 1600 km s NZDSF vláknem .....	33
Graf č. 8 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace DWDM systému délky 1600 km s NZDSF vláknem pro kanál 9 .....	35
Graf č. 9 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace DWDM systému délky 1600 km s NZDSF vláknem pro kanál 12 .....	35
Graf č. 10 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro 960Gb/s DWDM systém délky 800 km .....	40
Graf č. 11 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 4 .....	43
Graf č. 12 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 5 .....	43
Graf č. 13 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 4 .....	44
Graf č. 14 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 5 .....	45
Graf č. 15 – Závislost chybovosti BER na výkonu boosteru pro 640 Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 5 .....	46
Graf č. 16 – Závislost chybovosti BER na výkonu průběžných zesilovačů pro 640Gb/s DWDM systém délky 2400 km, kanál 5.....	47
Graf č. 17 – Závislost chybovosti přenosu na míře disperzní kompenzace pro 700Gb/s PM-QPSK systém délky 1600 km .....	51

## Seznam tabulek

<i>Tabulka č. 1 – Chybovost BER pro jednotlivé typy kompenzace pro 120km SMF vlákno .....</i>	<i>23</i>
<i>Tabulka č. 2 – Chybovost BER pro jednotlivé typy kompenzace pro 80km SMF vlákno .....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka č. 3 – Chybovost BER pro WDM systém.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabulka č. 4 – Chybovost BER pro DWDM systém délky 1600 km v závislosti na šumu průběžných zesilovačů .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka č. 5 – Chybovost BER pro DWDM systém délky 1600 km v závislosti na rozestupu kanálů .....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka č. 6 – Chybovost BER pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km v závislosti na délce regeneračního úseku .....</i>	<i>48</i>

## Seznam zkratek

<b>CW</b>	Kontinuální vlnová délka (Continuous Wavelength)
<b>CWDM</b>	Hrubý vlnový multiplex (Coarse Wavelength-Division Multiplexing)
<b>DCF</b>	Disperzně kompenzační vlákno (Dispersion Compensating Fiber)
<b>DPSK</b>	Diferenční fázové klíčování (Differential Phase Shift Keying)
<b>DQPSK</b>	Diferenční kvadrurní fázové klíčování (Differential Quadrature Phase Shift Keying)
<b>DSF</b>	Vlákna s posunutou disperzí (Dispersion Shifted Fiber)
<b>DWDM</b>	Hustý vlnový multiplex (Dense Wavelength Divison Multiplexing)
<b>EDFA</b>	Erbium dotovaný vláknový zesilovač (Erbium Doped Fiber Amplifier)
<b>FBG</b>	Vláknové Braggovské mřížky (Fiber Bragg Gratings)
<b>FWM</b>	Čtyřvlnné směšování (Four-Wave Mixing)
<b>MZM</b>	Mach-Zehnderův modulátor (Mach-Zehnder modulator)
<b>NRZ</b>	Modulace bez návratu k nule (Non Return-to-Zero)
<b>NZDSF</b>	Vlákno s nenulovou disperzí (Non Zero Dispersion-Shifted Fiber)
<b>OOK</b>	Amplitudové klíčování (On-Off Keying)
<b>OSNR</b>	Odstup optického signálu od šumu (Optical Signal-to-Noise Ratio)
<b>PIN</b>	Fotodioda p-i-n (p-i-n photodiode)
<b>PM-QPSK</b>	Kvadrurní fázové klíčování s polarizačním multiplexem (Polarization Multiplexed Quadrature Phase Shift Keying)
<b>PRBS</b>	Pseudonáhodná bitová sekvence (Pseudo-random Bit Sequence)
<b>QPSK</b>	Kvadrurní fázové klíčování (Quadrature Phase Shift Keying)
<b>SMF</b>	Jednovidové vlákno (Single-mode fiber)
<b>SSMF</b>	Standardní jednovidové vlákno (Standard Single-Mode Fiber)
<b>TDSS</b>	Dělení kroku v časové doméně (Time Domain Split-Step)
<b>WDM</b>	Vlnový multiplex (Wavelength-Division Multiplexing)

# 1. Úvod

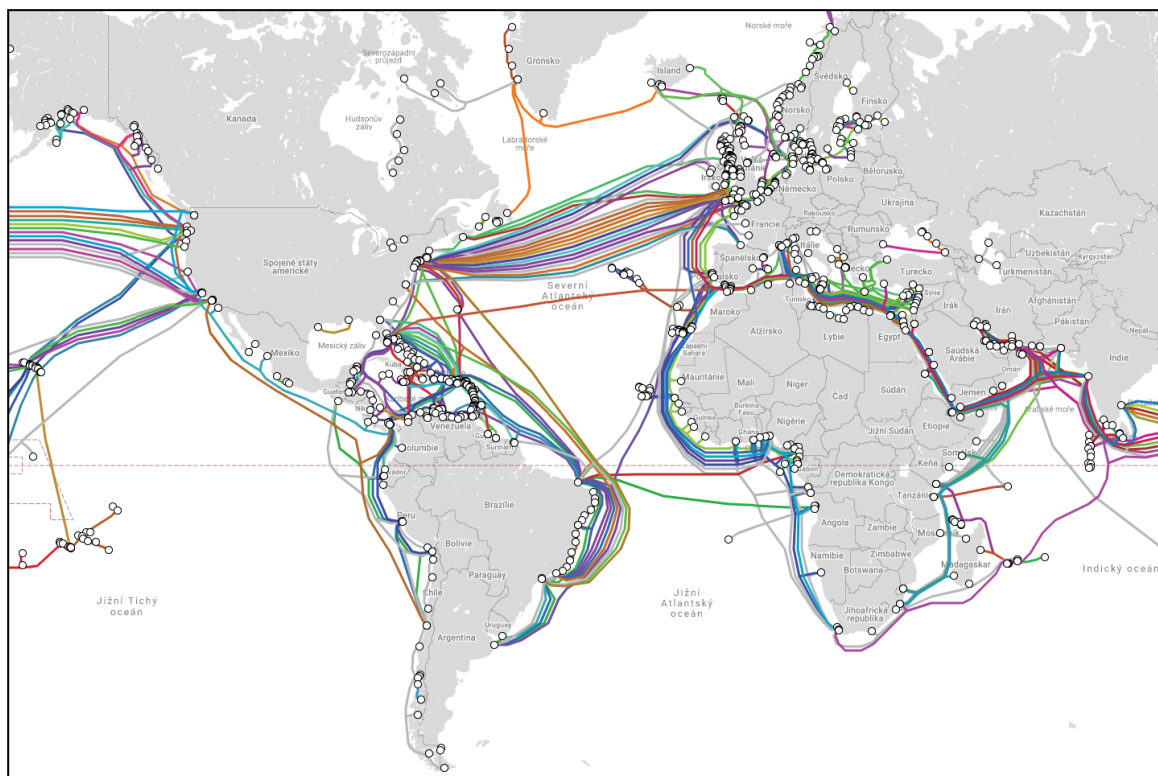
V minulosti byly k přenosu využívána výhradně metalická vedení. Zde však již přenosová technika narazila na fyzikální hranice a signál je prakticky nemožné přenášet v takové kvalitě, kterou umožňují optické spoje. Zde došlo v posledních letech k požadovanému zrychlení a zkvalitnění přenosu. Díky fyzikálním vlastnostem optického přenosového média i pořizovací ceně, se tato technologie významně rozšířila do celého světa. Optické mezikontinentální přenosové systémy v dnešní době zajišťují veškerou mezinárodní komunikaci.

Práce se zabývá problematikou návrhu mezikontinentálních přenosových systémů. Hlavním cílem je optimalizace optické mezikontinentální přenosové spoje. Tento cíl je realizován pomocí simulačního prostředí OptSim, přičemž je důraz kladen na analýzu jednotlivých faktorů ovlivňující kvalitu přenosu. Jedná se zejména o lineární a nelineární jevy, které přenosový signál výrazně degradují. Dalšími fyzikálními faktorem projevující se při přenosu optické informace je disperze. Zmíněné dílčí faktory lze částečně eliminovat použitím vhodných modulací. Dále je třeba hledat a hodnotit postupy, jež by přispěly ke zvýšení rychlosti a kvality datového toku optickým spojem.

V úvodní části práce je popis přenosového systému a jednotlivých fyzikálních faktorů ovlivňující kvalitu přenosu. Rovněž jsou uvedeny měřicí parametry a popis simulačního prostředí. V následující části bylo vytvořeno několik dílčích simulací sloužících k porozumění podstaty vzniku nežádoucích vlivů a vlastnostem přenosového systému. V závěrečné části bylo sestaveno několik vysokokapacitních přenosových optických systémů, na kterých byly doposud získané poznatky testovány tak, aby bylo dosaženo co nejlepších možných výsledků.

## 2. Aktuální stav problematiky

Optické přenosové systémy tvoří nezastupitelnou složku na poli komunikačních technologií. Využívají se jako páteřní spojení mezi kontinenty, které disponují obrovskou přenosovou kapacitou a postupně nahrazují metalické spoje i na regionální úrovni. Hlavními důvody jsou energetická úspora, vyšší kvalita přenosu a zejména řádově vyšší přenosová rychlost. V současné době je položeno na mořském dně přes 400 transoceánských kabelů o celkové délce 1,2 miliónu km [11]. Nejdelší z nich dosahují délek přes 10 000 km. Přenosová rychlost těchto kabelů se za posledních 30 let zvýšila z jednotek Gb/s na stovky Tb/s. Například v roce 2022 je plánováno položení optického kabelu Grace Hopper, který bude spojoval Ameriku s Velkou Británií. Měl by dosáhnou celkové přenosové rychlosti až 350 Tb/s. [10]



Obrázek č. 1 – Mapa podmořských optických spojů [8]

## 2.1 Podmořské optické přenosové systémy

V systémech pro optický přenos na dlouhé vzdálenosti se využívá technologie Wavelength-Division Multiplexing, zkráceně WDM. Již z názvu je patrné, že se optický svazek frekvenčně rozdělí a následně naváže do jednovidového vlákna SSMF (angl. Standart single-mode fiber). Počet pásem, na který se svazek rozdělí, záleží na použité technologii. Standardně rozlišujeme dvě rozdělení CWDM (angl. Coarse Wavelength-Division Multiplexing) a DWDM (angl. Dense Wavelength-Division Multiplexing).

Řídký vlnový multiplex neboli CWDM se podle normy ITU-T G695 vyznačuje 20nm rozestupem jednotlivých kanálů v pásmu zhruba 1300 až 1600 nm [18]. Tato technologie disponuje menší přenosovou rychlostí. Pohybuje se v jednotkách Gb/s. Díky větší kanálové rozteči nejsou pro CWDM třeba světelné zdroje s vysokou kvalitou záření. Mohou mít proto širší spektrální charakteristiku a nevyžadují přídavné chlazení. To přispívá k značné finanční úspoře. V poslední době se od CWDM technologie upouští a nahrazuje ji DWDM neboli hustý vlnový multiplex.

DWDM má mnohem menší kanálovou rozteč. Jedná se o vzdálenost menší než 1 nm [21]. Pro přenos se používají telekomunikační pásma C a L, což zhruba odpovídá 1500 až 1600 nm [22]. V tomto pásmu vykazuje optické vlákno nejmenší útlum. Díky lepší spektrální účinnosti lze pomocí DWDM technologie přenášet obrovské datové toky, které mohou dosáhnout až jednotek Tb/s, proto se v moderních optických podmořských spojích využívá právě technologie DWDM.

Základní struktura optického přenosového systému se skládá z vysílačů, které disponují přenosovou rychlostí od 1 do 400 Gb/s [24]. Pomocí multiplexorů se sloučí do jednoho optického svazku a ten se přenáší optickým vláknem. V případě, že se přenáší signál na vzdálenost větší než 100 km, musí dojít k regeneraci signálu prostřednictvím zesilovačů. Na straně přijímače následuje opačný postup. Svazek se pomocí demodulátoru rozloží na jednotlivé frekvenční složky a dojde ke změně optické informace na informaci elektrickou.

## 2.2 Nežádoucí jevy ovlivňující přenosový systém

Na signál přenášený systémem působí řada nežádoucích vlivů. Při návrhu optické trasy je naprosto klíčové tyto jevy eliminovat. Výborná kompenzace jednoho vlivu však může vyvolat nežádoucí jev a ten přenos výrazně zhorší. Proto je důležité pohlížet na přenosový systém jako na celek a přistupovat k němu komplexně.

### 2.2.1 Útlum vlákna

Vlivem absorpce a rozpadem světelných paprsků vznikají výkonové ztráty v optickém vlákne. Ke ztrátám dochází přímo v materiálu vlákna, na rozhraní prostředí vlákna, ve spojích a také na mikroohybech a na makroohybech vlákna. Celkový útlum je sumou útlumů dílčích.

Útlum absorpcí materiálu spočívá v pohlcení části světelného svazku molekulami přenosového média. Nejčastěji křemíku. Část svazku také pohltí nečistoty, které se ve vlákne nacházejí. Tento typ absorpce je silně závislý na vlnové délce optického záření.

Rayleighův rozptyl vzniká kolizí mezi molekulami jádra a optickým zářením. Vlivem kolize se energie všesměrově odráží. Odkloněné záření nesplňuje podmínku pro odraz na rozhraní jádra a pláště a v plášti se ztrácí [13]. Výpočet koeficientu Rayleighova rozptylu se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$\gamma_R = \frac{8\pi^3}{3\lambda^4} \cdot n^8 \cdot p^2 \cdot \beta_c \cdot T_F \cdot K \quad (2.1)$$

Zde  $\lambda$  značí vlnovou délku záření,  $n$  je index lomu,  $p$  označuje fotolektrický koeficient,  $K$  je Boltzmanova konstanta,  $\beta_c$  označuje izotermální stlačitelnost při fiktivní teplotě  $T_F$ . Ze vzorce je patrné, že útlum klesá se vzrůstající vlnovou délkou se čtvrtou mocninou a je přímo úměrný osmé mocnině indexu lomu přenosového media.

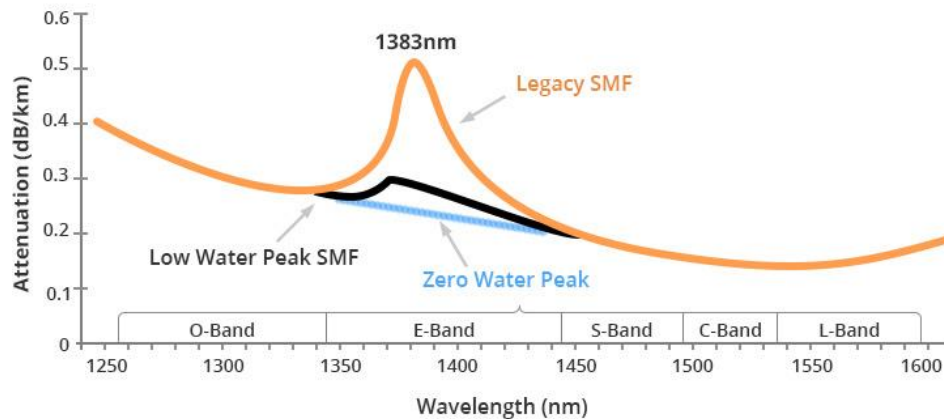
Další útlumovou složkou vlákna je ztráta, která vzniká ohybem vlákna. Zpravidla rozlišujeme dva typy ztrát. Ztráty, které vznikají makroohyby a mikroohyby vlákna. Při makroohybu dochází ke změně úhlů dopadu a odrazu světelných svazků. To může mít za následek, že část světelného záření, která překročí mezní úhel dopadu, se zpětně nenavrátil do optického jádra, ale pohltí ji plášť vlákna [14]. Minimální poloměr je závislý na průměru optického vlákna a materiálu, ze kterého je vlákno vyrobeno. Těmto ztrátám lze při projektování trasy předcházet dodržením doporučených hodnot ohybu, který udávají výrobci. Koeficient ohybových ztrát je vyjádřen vzorcem:

$$\alpha_r = c_1(R) \cdot e^{-c_2(R) \cdot R} \quad (2.2)$$

kde  $R$  značí poloměr zakřivení vlákna.

Mikroohyby se vyznačují velikostí srovnatelnou s vlnovou délkou záření. Vznikají při výrobě vlákna a působením vnějších vlivů na vlákno. Jedná se o malé geometrické chyby, které se vyskytují po celé délce vlákna. Jejich výskyt je náhodný.

Celkový útlum vlákna se udává v jednotkách dB/km. SMF vlákno má útlum 0,2 dB/km okolo vlnové délky 1550 nm.



Obrázek č. 2 – Závislost útlumu SMF vlákna na vlnové délce [5]

### 2.2.2 Disperze

Dalším nežádoucím jevem, který zhoršuje přenos a zvyšuje chybovost je disperze. Jedná se o roztážení světelného pulsu v čase. Rozlišujeme tři typy disperzí: chromatickou, vidovou a polarizační. V přenosových systémech na dlouhé vzdálenosti se projevuje zejména chromatická disperze. Skládá se ze dvou složek, materiálové a vlnovodné. Materiálová disperze je způsobena různou rychlostí šíření jednotlivých frekvenčních složek ve světelném pulsu v dané látce. Index lomu materiálu je frekvenčně závislý, je tedy různý pro rozdílné vlnové délky.

Vlnovodná disperze je způsobena změnou tvaru vidu a souvisí s geometrií vlákna. Její hodnoty jsou vždy záporné. Jak již bylo uvedeno, chromatická disperze způsobí rozšiřování světelného pulzu na straně přijímače. V případě, že je rozšíření velmi výrazné a jednotlivé kanály jsou blízko u sebe, jako je tomu u DWDM, může docházet k přeslechům. Přeslechy dramaticky zvyšují chybovost. Na druhé straně nenulová chromatická disperze potlačuje nelineární jevy jako je FWM (angl. Four-wave Mixing). Standardní hodnota disperze pro SMF vlákno se pohybuje při 1550 nm okolo 16 ps/nm/km [31]. Tato hodnota by omezila přenos systému na vzdálenost menší než 100 km, proto musí být v optické trase disperze kompenzována. Zvláště u DWDM systémů a při větší přenosové rychlosti jednotlivých kanálů je kladen důraz na pečlivou kompenzaci.



S rostoucí rychlostí kanálů se dosažená vzdálenost snižuje s druhou mocninou násobku rychlosti. Pro přechod z přenosové rychlosti kanálu 40 Gb/s na 100 Gb/s se maximální dosažená vzdálenost zkrátí více než šestinásobně. Chromatická disperze může nabývat záporných i kladných hodnot. Vychází z rovnice:

$$D = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \cdot \frac{\delta^2 k}{\delta \omega^2} \quad (2.3)$$

Koeficient disperze, který se používá v optických systémech určíme ze vztahu:

$$D(\lambda) = \frac{\delta t_{sk}}{\delta \lambda} \quad (2.4)$$

kde  $t_{sk}$  značí celkové skupinové zpoždění signálu procházející optickým prostředím.

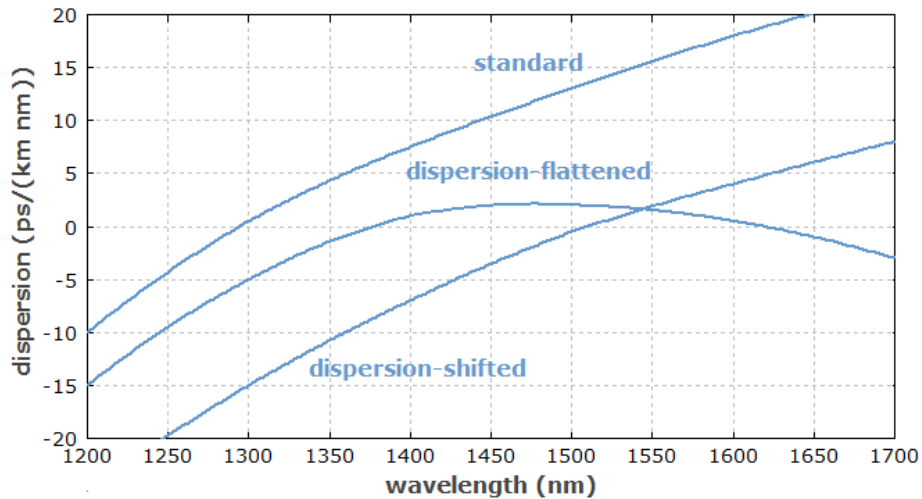
Sklon disperzní křivky lze určit podle vztahu:

$$S(\lambda) = \frac{\delta D}{\delta \lambda} \quad (2.5)$$

V praxi se používají dvě základní metody pro kompenzaci chromatické disperze. Tou nejrozšířenější je kompenzace pomocí vlákna DCF (angl. Dispersion Compensating Fiber). DCF vlákno se vyznačuje vysokou zápornou hodnotou disperze a disperzní křivky. Přidáním DCF po určitém úseku přenosového SMF vlákna se docílí vyrušení kladné složky disperze a dojde ke "smrštění" optického pulsu do původního tvaru. Mezi hlavní nevýhody DCF patří velký útlum vlákna, neschopnost navázat velké množství energie a nedostatečná kompenzace disperzní křivky. Vlivem nedostatečné kompenzace disperzní křivky dochází k akumulaci residuální disperze, která způsobí výrazné zhoršení přenosu [25]. To lze pozorovat zejména u systémů DWDM. Problematická je také neschopnost navázat velké výkonové úrovně. Vlivem toho musí být do celé optické trasy přidáno více EDFA zesilovačů, což má za následek výrazné snížení OSNR.

Druhou metodou pro potlačení chromatické disperze je využití Braggovy mřížky. Braggova mřížka (zkráceně FBG) je struktura vzniklá periodickými změnami indexu lomu v jádře. Její základní vlastností je odraz některých vlnových délek při propuštění ostatních. Vhodným nastavením FBG lze docílit odrazu kratších vlnových délek dříve a delších později. Díky tomu se rychlost vlnových délek vyrovná a dojde opět k časové kompresi pulzu. Hlavní výhodou, která je velmi důležitá oproti DCF modulu, je lepší kompenzace disperzní křivky. U DWDM systému se tato vlastnost projeví výrazným snížením chybovosti.

Potlačení disperzních jevů lze také dosáhnout vhodnou volbou přenosového vlákna. K tomuto účelu byla navržena disperzně posunutá DSF (angl. Dispersion Shifted Fiber) vlákna. Vyznačují se nižší hodnotou disperze okolo 4 ps/nm/km pro 1550 nm [26]. Tato hodnota výrazně zlepšuje přenos a zároveň nepodporuje vznik FWM.



Obrázek č. 3 – Závislost disperze na vlnové délce pro různé typy vláken [6]

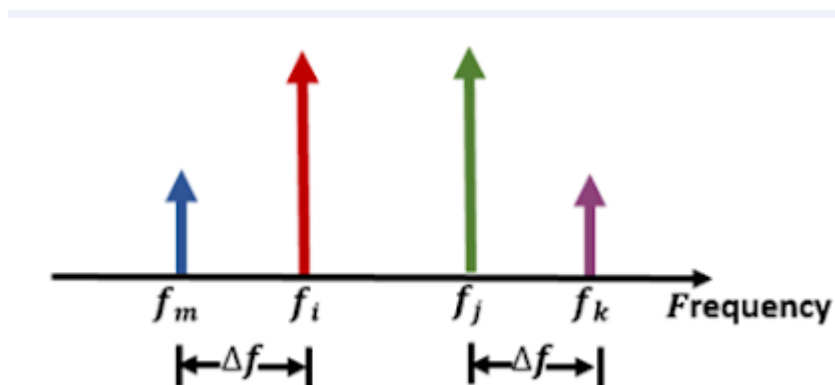
V podmorských mezikontinentálních spojích se kompenzační prvky DCF nebo FBG umísťují na stejná místa jako průběžné zesilovače. Ušetří se finanční náklady a zmenší se počet přístupových bodů nutných k revizi. Oba tyto moduly nejsou náročné na údržbu.

### 2.2.3 Čtyřlenné směšování (FWM)

Čtyřlenné směšování je nelineárním jevem, který je důležité při návrhu optických přenosových sítí vzít v potaz. Jev vzniká při navazování světelného svazku o velké intenzitě, jelikož prostředí se při této intenzitě nechová lineárně. Interakcí mezi třemi optickými zářeními s různou frekvencí vznikají nové intermodulační složky, které lze spočítat podle vzorce [28]:

$$f_{ijk} = f_m = f_i + f_j - f_k \quad (2.6)$$

Jak je ze vzorce patrné, nově vzniklé složky vznikají na násobcích frekvencí. To je velmi nežádoucí, jelikož kanálová rozteč je u DWDM systémů konstantní a jednotlivé kanály jsou blízko u sebe.

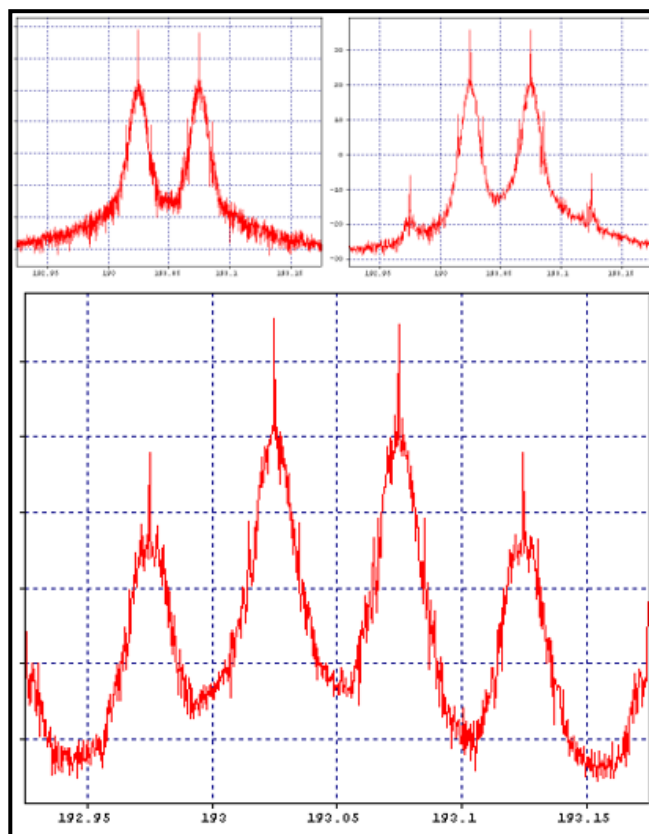


Obrázek č. 4 – Znázornění nově vzniklé intermodulační složky (modrá barva) [7]

Tyto složky přímo zasahují do ostatních užitečných kanálů a dochází k interferenci. Ta pak značně zvyšuje celkovou chybovost přenosu. Celkové množství intermodulačních složek závisí na počtu kanálů a lze vyjádřit podle vzorce [27]:

$$M = \frac{N^2}{2} \cdot (N - 1) \quad (2.7)$$

Jednou z dalších podmínek pro vznik FWM je kromě velkého výkonu také nulová disperze. Ta způsobí fázový soulad, a proto také lepší interferenci intermodulačních produktů s užitečnými kanály. Pro narušení tohoto souladu a snížení vlivu FWM se používají vlákna s nenulovou disperzí NZDSF (Non-zero dispersion-shifted fiber). Snížení FWM lze také dosáhnout polarizací. Na následujícím obrázku je zobrazen vliv FWM na spektrum signálu. Vlevo nahoře se nachází původní spektrum signálu. Pro pravé spektrum byl zvýšen výkon navazovaný do vlákna. Dolní spektrum je kombinací použití velkého vstupního výkonu a kompenzace disperze na nulu.



Obrázek č. 5 – Ukázka vlivu FWM na spektrum signálu

## 2.3 Modulační formáty

Další důležitou složkou při přenosu optického signálu je použitá modulace. Jednotlivé modulační formáty se liší přenosovou rychlostí a robustností. Pro různé generace optického přenosu se modulační formáty liší zásadně. V 10Gb/s systémech se nejčastěji používá amplitudová modulace On-off keying (OOK). Při navýšení kanálové rychlosti z 10 Gb/s na 40 Gb/s přestala být amplitudová modulace vhodná. Ve 40 Gb/s se uplatňuje mnoho modulačních formátů. Nejčastěji jde o duobinární modulaci a fázové modulační formáty DPSK s DQPSK. V nejmodernějších 100Gb/s systémech je kladen důraz na PM-QPSK. Pro 400Gb/s přenosy byly navrženy modulační formáty jako PAM4, DMT a PDM-64QAM [29]

### 3. Simulační prostředí a měřené parametry

Pro simulace bylo použito prostředí OptSim, které vyvinula firma Rsoft. V něm nalezneme knihovnu předpřipravených komponentů – vysílače, přijímače, multiplexory a zesilovače. Jednotlivé komponenty lze skládat do hierarchických struktur nebo iteračních smyček. V případě, že žádný komponent nevyhovuje, lze si v prostředí vytvořit vlastní. Program pracuje ve dvou módech – Sample mode a Block mode. V Block módu se přistupuje k datům po blocích. V Sample modu se data rozdělí na jednotlivé vzorky. Prostředí využívá k výpočtu metodu TDSS (angl. Time Domain Split–Step), která vychází z Fourierovy transformace a přistupuje k frekvenční a časové složce separátně.

#### 3.1 BER

Nezákladnějším vyhodnocovacím parametrem je bezpochyby BER (angl. Bit Error Rate). Tento parametr udává poměr chybně přenesených bitů k celkovému počtu přenesených bitů.

$$BER = \frac{N_{chyb}}{N_{celk}} \quad (3.1)$$

Může nabývat hodnot v rozmezí 0 až 1. Podle doporučení ITU-T by se celková chybovost přijímaného signálu měla pohybovat pod  $10^{-12}$ . V praxi pro plnohodnotný přenos stačí chybovost řádově vyšší.

#### 3.2 OSNR

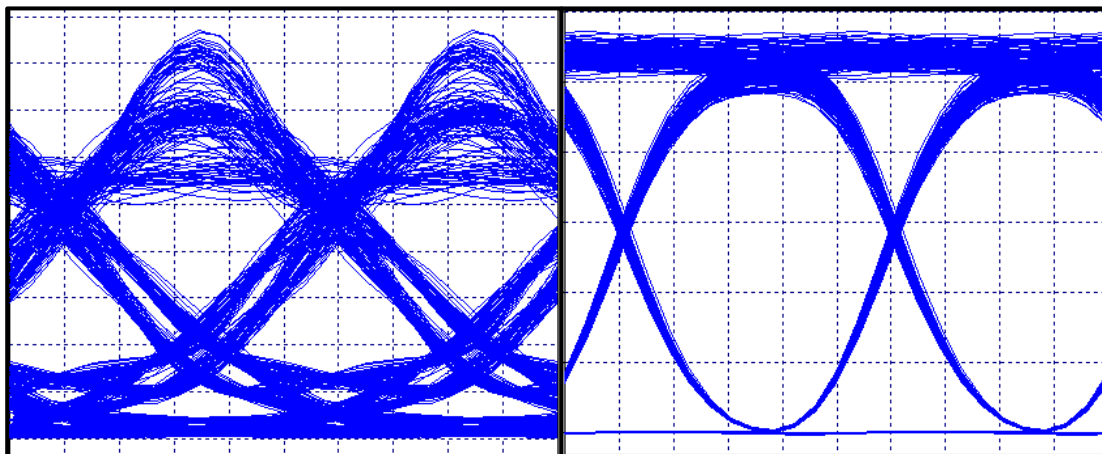
Parametr OSNR vyjadřuje poměr výkonu signálu ku výkonu šumu.

$$OSNR = \frac{P_S}{P_N} \quad (3.2)$$

Každý prvek zanesen do optické trasy obecnou míru šumu. Největším zdrojem šumu v optické trase jsou zesilovače. Při výrazném poklesu OSNR se zvýší BER, proto je z hlediska optimalizace trasy nutné počet zesilovačů v optické trase co nejvíce omezit.

### 3.3 Oko rozhodnutí

Eye-diagram neboli oko rozhodnutí je plocha, na kterou je promítnuta superpozice všech přijatých bitů. Lze tak lépe určit původ zkreslení a příčinu zhoršení signálu. Má definovanou rozhodovací úroveň. V případě, kdy je úroveň překročena, dojde k chybnému vyhodnocení symbolu. Více otevřené oko rozhodnutí odpovídá lepšímu přenosu.



Obrázek č. 6 – Diagramy oka rozhodnutí, na levé straně je signál ovlivněn vlivem disperze, na pravé straně se nachází ideální signál s téměř nulovou chybou

### 3.4 Q-faktor

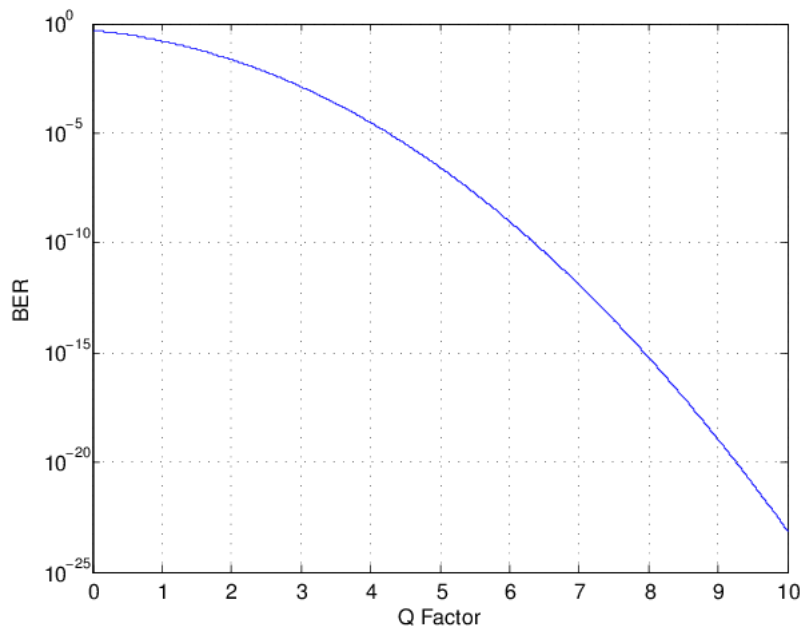
Q-faktor se určuje z oka rozhodnutí. Lze jednoduše odečíst z tohoto diagramu a je definován vztahem.

$$Q = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.3)$$

Pomocí Q-faktoru lze spočítat i OSNR podle vztahu.

$$OSNR = 20 \cdot \log(Q) \quad (3.4)$$

Vztah mezi Q-faktorem a chybovostí BER zobrazuje následující graf.



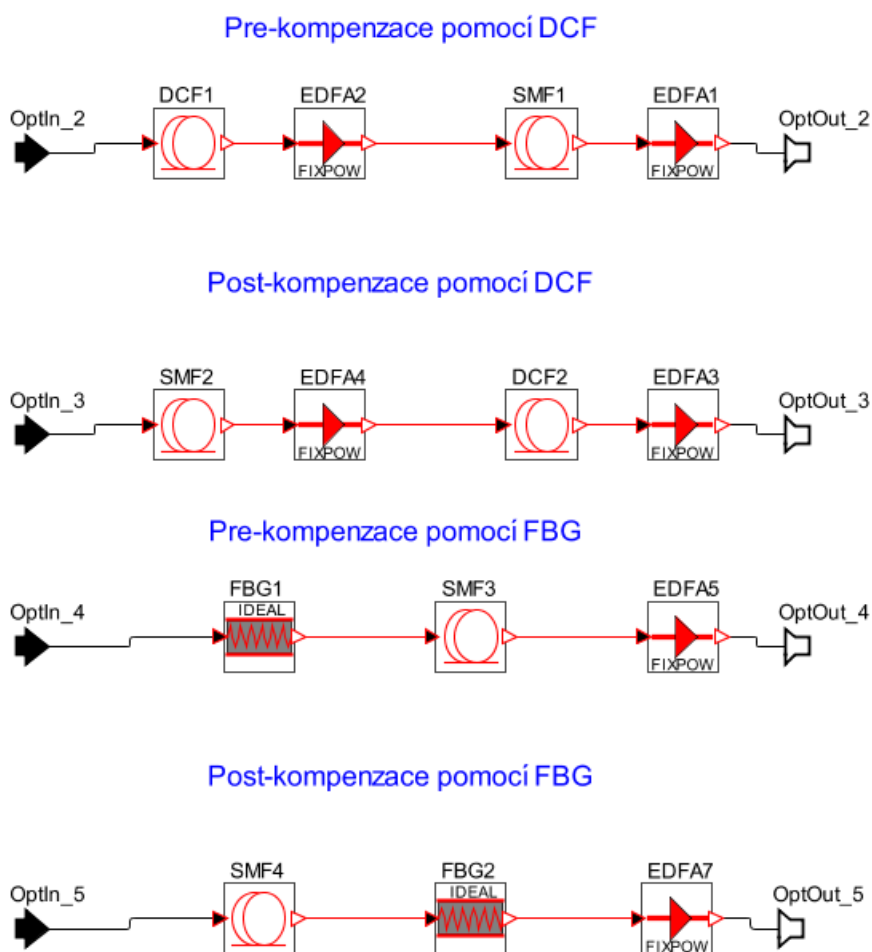
Obrázek č. 7 – Graf závislosti mezi BER a Q-faktorem [9]

## 4. Simulace a výsledky

V kapitole je popsána řada dílčích simulací, které byly vytvořeny za účelem optimálně navrhnout podmořský optický spoj. Postupně byla zkoumána řada stěžejních faktorů, podílejících se na kvalitě přenosu. V první části jsou jednotlivé faktory simulovány odděleně. Je zkoumán jejich vliv a podstata vzniku. V části následující bylo vytvořeno několik spojů, které splňují zadané vlastnosti a získané poznatky na nich byly otestovány.

### 4.1 Simulace kompenzace disperze

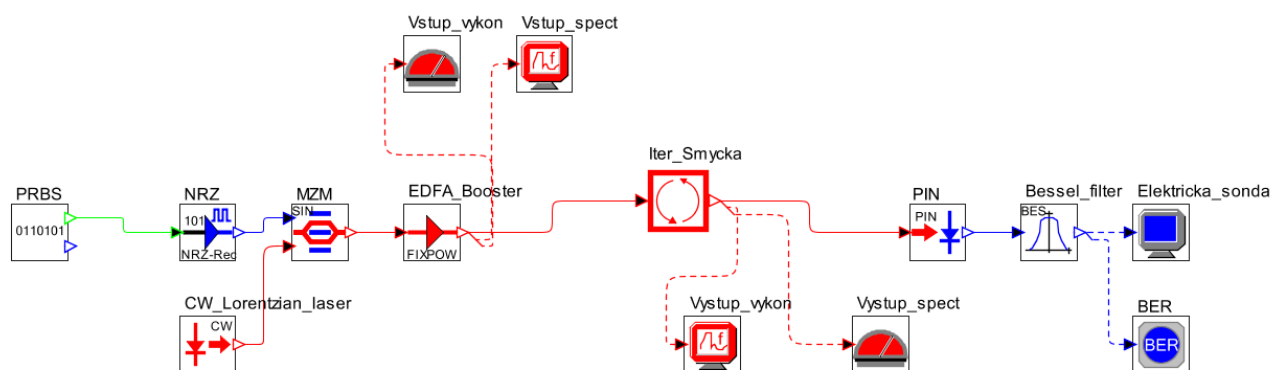
V následující části je porovnáván vliv několika kompenzačních metod. Důvodem těchto simulací je následné zahrnutí získaných poznatků do komplexních návrhů podmořských sítí. V první řadě jde o srovnání DCF a FBG modulu. Následně je srovnávána metoda pre-kompenzace a post-kompenzace. Pre-kompenzace značí vložení DCF nebo FBG modulu před přenosové optické vlákno. U post-kompenzace je tomu naopak. Symetrická kompenzace, která se vyznačuje přidáním dalšího zesilovače, pro porovnání nebyla uvedena, jelikož je pro velmi dlouhé optické trasy nevhodná. Šum průběžných zesilovačů hraje značnou roli při degradaci signálu.



Obrázek č. 8 – Schémata jednotlivých typů disperzní kompenzace v prostředí OptSim



Pro simulaci byla navržena velmi jednoduchá topologie. Jedná se o jednokanálový spoj o přenosové rychlosti 10 Gb/s. Vysílací strana se skládá z generátoru pseudonáhodné bitové posloupnosti PRBS (Pseudo-random Bit Sequence), NRZ (Non-return-to-zero) ovladače a MZM (Mach-Zehnderova) modulátoru. Jako optický zdroj je použit CW (Continuous Wavelength) Lorentzian laser o vstupním výkonu 1 mW. Následuje výkonový zesilovač EDFA a iterační smyčka, ve které se nachází přenosová část. Ta je vytvořena podle schématu na obrázku č. 7. Skládá se ze 120 km dlouhého SMF vlákna. Disperze vlákna je 16 ps/nm/km pro pracovní vlnovou délku 1550 nm a útlum vlákna byl nastaven na standardní hodnotu 0,2 dB/km. Disperze je zcela kompenzována DCF vláknem o délce 24 km, které má hodnotu -80 ps/nm/km. Při použití kompenzačního modulu FBG byla nastavena jeho hodnota na -1920 ps/nm. V každé smyčce se nachází průběžné zesilovače EDFA, u kterých je nastaven zisk na hodnotu 0 dBm. Přijímací část se skládá z PIN diody a Besselova filtru. Ostatní moduly slouží k měření průběžných hodnot signálu.



Obrázek č. 9 – Simulační schéma topologie přenosového systému

Simulace byly prováděny pro různé délky optického spoje. Porovnání bylo provedeno na základě chybovosti BER a výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka č. 1 – Chybovost BER pro jednotlivé typy kompenzace pro 120km SMF vlákno

	Vzdálenost [km]			
	600	1200	1800	2400
Pre-kompenzace DCF	$0,11 \cdot 10^{-34}$	$0,31 \cdot 10^{-15}$	$0,16 \cdot 10^{-7}$	$0,41 \cdot 10^{-4}$
Post-kompenzace DCF	$0,99 \cdot 10^{-40}$	$0,72 \cdot 10^{-19}$	$0,37 \cdot 10^{-11}$	$0,33 \cdot 10^{-5}$
Pre-kompenzace FBG	$0,99 \cdot 10^{-40}$	$0,67 \cdot 10^{-17}$	$0,16 \cdot 10^{-11}$	$0,23 \cdot 10^{-5}$
Post-kompenzace FBG	$0,99 \cdot 10^{-40}$	$0,15 \cdot 10^{-22}$	$0,41 \cdot 10^{-17}$	$0,96 \cdot 10^{-10}$

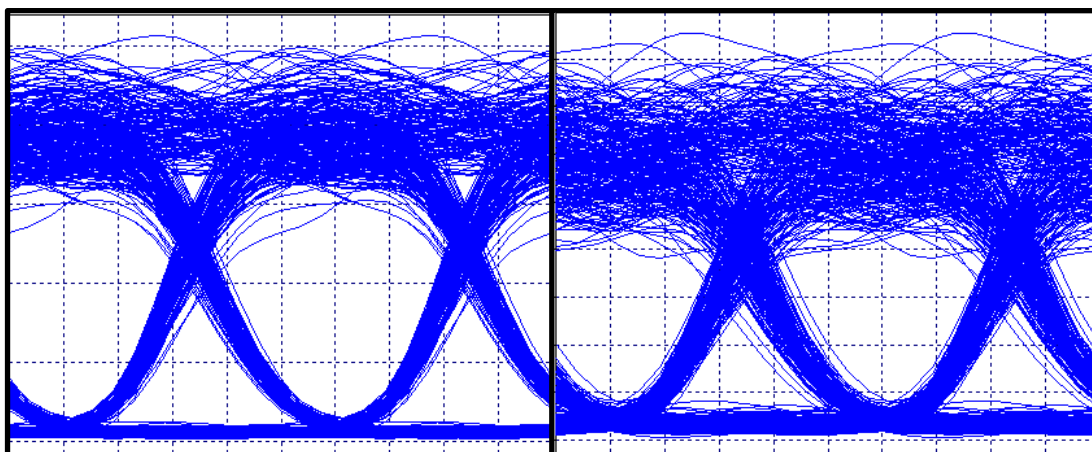
Z tabulky je patrné, že nejlepších výsledků dosáhla post-kompenzace pomocí Braggovy mřížky, a to pro všechny délky optického spoje. Je nutné si povšimnout, že obě metody post-kompenzace dosáhly lepších výsledků. Ať už pro DCF, nebo FBG modul. Jedním z důvodů může být fakt, že kompenzační moduly nenavazují optimálně větší vstupní výkonové úrovně. Z této skutečnosti plyne, že vhodnějším řešením je kompenzační modul umístit až za přenosové vlákno. Hodnota  $0,99 \cdot 10^{-40}$  je mezní hodnotou simulačního prostředí. Jedná se tedy o nejlepší možný dosažený výsledek.

V další části je testováno, zda dojde ke zlepšení celkové chybovosti pro kratší délku SMF vlákna. Topologie optického spoje zůstala stejná, pouze byla pozměněna délka přenosového vlákna ze 120 km na 80 km. Vlivem toho je použito v optické trase více průběžných zesilovačů EDFA. Úroveň výkonu zesilovačů byla snížena na -3 dBm, jelikož jich je v trase zastoupeno větší množství. Moduly DCF a FBG byly přepočítány, aby došlo k celkové kompenzaci disperze. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka č. 2 – Chybovost BER pro jednotlivé typy kompenzace pro 80km SMF vlákno

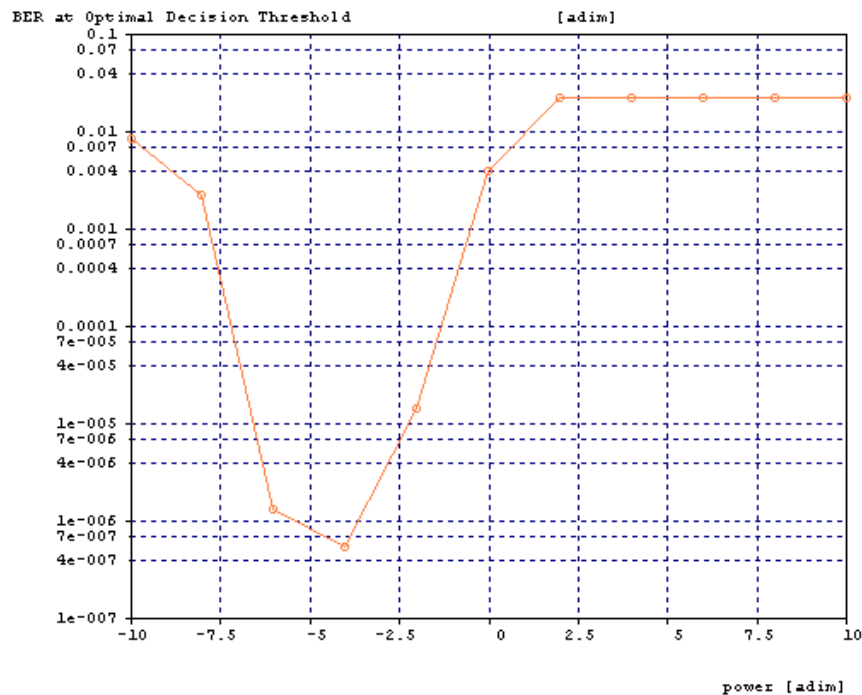
	Vzdálenost [km]			
	1200	2400	3600	4800
Pre-kompenzace DCF	$0,66 \cdot 10^{-25}$	$0,13 \cdot 10^{-5}$	$0,76 \cdot 10^{-5}$	$0,93 \cdot 10^{-4}$
Post-kompenzace DCF	$0,25 \cdot 10^{-29}$	$0,72 \cdot 10^{-12}$	$0,76 \cdot 10^{-5}$	$0,10 \cdot 10^{-3}$
Pre-kompenzace FBG	$0,86 \cdot 10^{-36}$	$0,70 \cdot 10^{-15}$	$0,92 \cdot 10^{-9}$	$0,10 \cdot 10^{-5}$
Post-kompenzace FBG	$0,57 \cdot 10^{-37}$	$0,67 \cdot 10^{-17}$	$0,46 \cdot 10^{-9}$	$0,92 \cdot 10^{-5}$

Na první pohled došlo k velmi výraznému zlepšení. Vzdálenost se při stejné chybovosti téměř zdvojnásobila. Nejlepších hodnot opět dosahovala post-kompenzace pomocí FBG. Vlivem toho bude tento typ používán v návrhu složitějších spojů. Jedním z důvodů rapidního zlepšení, je menší úroveň výkonu průběžných zesilovačů, která mohla být použita, jelikož regenerace signálu probíhá častěji. Na následujícím obrázku je porovnání post-kompenzace pomocí FBG při délce optického spoje 2400. Rozdíl mezi chybovostmi BER je pro toto srovnání 7 řádů.



Obrázek č. 10 – Diagram oka rozhodnutí pro post-kompenzaci pomocí FBG pro celkovou délku 2400 km, vlevo se nachází diagram pro délku vlákna 80 km, vpravo pro 120 km

Pro zajímavost byla provedena analýza úrovně výkonu pro nejuspěšnější metodu kompenzace, tedy pro post-kompensaci pomocí FBG. Závislost chybovosti na úrovni výkonu průběžných zesilovačů je vynesena v následujícím grafu.



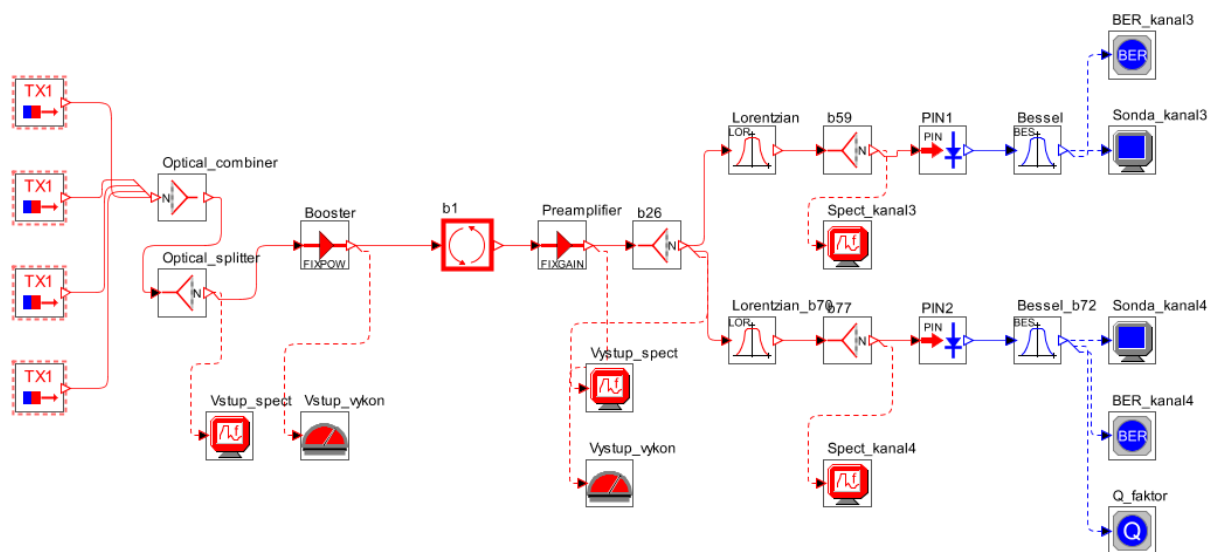
Graf č. 1 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro optický spoj délky 4800 km, byla použita post-kompensace pomocí FBG

Z grafu je patrné, že hodnota úrovně výkonu -3 dBm byla nastavena optimálně. Vysoký nebo příliš malý výkon chybovost výrazně zhoršuje. Lepší chybovosti než je zanesena v tabulce č.2 nebylo dosaženo pro žádnou výkonovou úroveň.

## 4.2 Simulace WDM systému

Pro následující simulaci byla navržena topologie 10 Gb/s WDM systému. Systém se skládá ze 4 NRZ vysílačů o přenosové rychlosti 2,5 Gb/s. Výkon CW laseru byl nastaven na 1 mW. Rozteč mezi kanály byla nastavena na 1 nm o střední frekvenci 1550 nm. Vláknem bylo ponecháno z předchozí simulace, tedy disponuje disperzí 16 ps/nm/km pro vlnovou délku 1550. Délka SMF vlákna byla ponechána na 80 km i jeho útlum zůstal nezměněn – tedy 0,2 dB/km. Použita byla post-kompensace pomocí FBG, která dosahovala nejlepších výsledků v předchozí simulaci. Systém byl doplněn o předzesilovač. Hodnota úrovně výkonu u vstupního zesilovače byla nastavena na 6 dBm, u předzesilovače na 25 dBm a u průběžného zesilovače na 8 dBm. Celá topologie byla navržena zejména s ohledem na robustnost systému. Proto byla použita amplitudová modulace a nízká přenosová rychlost. To umožňuje

pracovat s velkými výkony v celé topologii a výrazně se tím zvýší OSNR. Schéma topologie je uvedeno na následujícím obrázku.



Obrázek č. 11 – Simulační schéma topologie 10Gb/s WDM systému

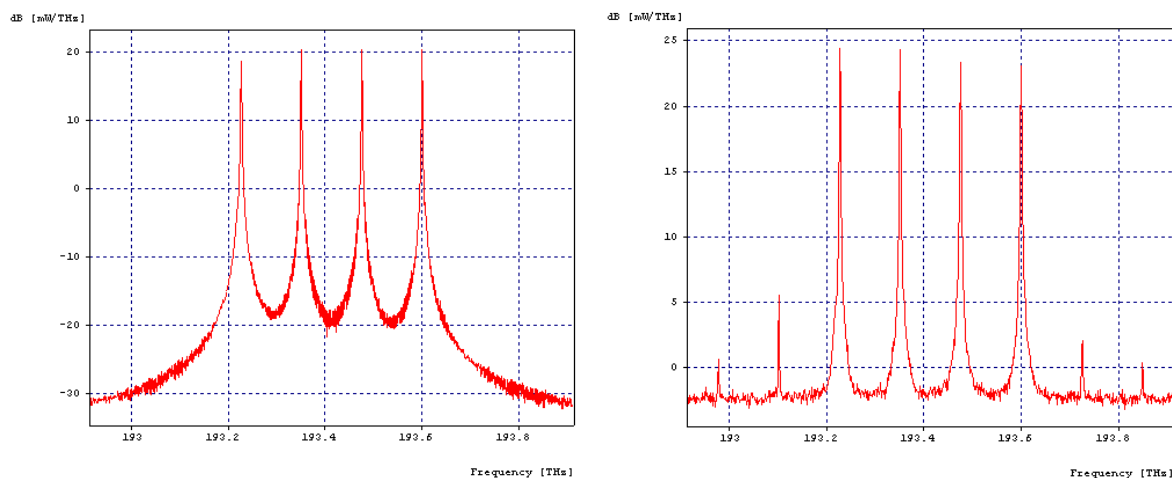
Simulace byla nejprve provedena pro různou délku optické trasy. Byly porovnány kanály 3 a 4 z hlediska chybovosti BER. Výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka č. 3 – Chybovost BER pro WDM systém

	Vzdálenost [km]			
	2400	4000	8000	10000
Kanál 3	$0,99 \cdot 10^{-40}$	$0,30 \cdot 10^{-22}$	$0,31 \cdot 10^{-15}$	$0,75 \cdot 10^{-10}$
Kanál 4	$0,23 \cdot 10^{-28}$	$0,37 \cdot 10^{-15}$	$0,17 \cdot 10^{-15}$	$0,93 \cdot 10^{-8}$

Ze získaných hodnot lze usoudit, že systém je robustní a dokáže přenést optická data na velmi dlouhou vzdálenost za nízké chybovosti. Je vidět i rozdíl mezi jednotlivými kanály, který se s rostoucí vzdáleností zmenšuje. Pro další simulace bude použit systém o délce 4000 km. Hlavním důvodem je výpočetní a časová náročnost simulace, která se pro zde nejdelší uvedenou vzdálenost 10 000 km pohybuje v řádu hodin až dnů. Menší než tuto zvolenou vzdálenost je nevhodné použít, jelikož chybovost dosáhla pro kanál 3 limitní hodnoty, tudíž vylepšit ji z hlediska simulačního prostředí již není možné.

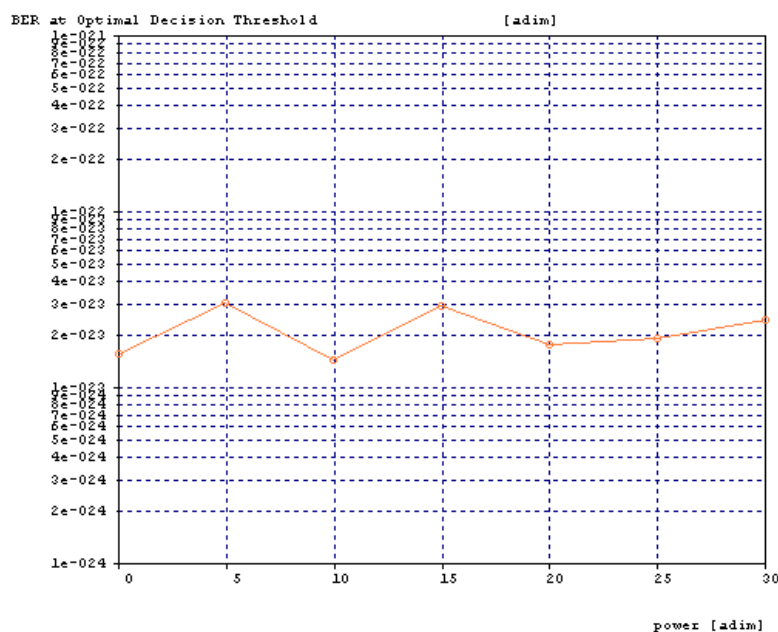
Pro optický spoj délky 4000 km je vyobrazeno vstupní i výstupní spektrum na následujícím obrázku.



Obrázek č. 12 – Vstupní a výstupní spektrum WDM systému délky 4000 km

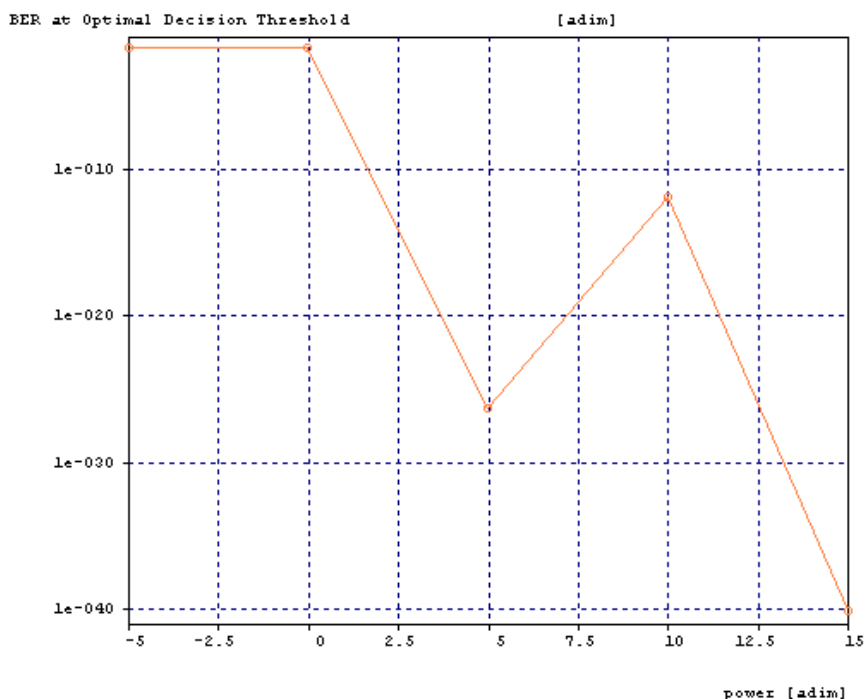
Rozdíl mezi oběma spektry je zřetelný. Ve výstupním spektru se objevuje šum, který má vůči užitečnému signálu malý výkon. Hlavním zdrojem zmíněného šumu jsou zesilovače EDFA a další komponenty. V celé trase je jich více než 50. OSNR je tedy vysoké. I přesto se však šum projeví na zhoršení chybovosti. Vlivem vysokého výkonu a kompenzaci disperze na nulovou hodnotu, si lze povšimnout intermodulačních produktů, které vznikají vlivem FWM.

V dalším kroku je posuzován vliv koncového předzesilovače na přenosový systém z hlediska jeho výkonové úrovně. Ostatní komponenty v celé topologii zůstaly nezměněny. Závislost chybovosti na úrovni výkonu je vyobrazena na následujícím grafu.



Graf č. 2 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu koncového předzesilovače pro WDM systém délky 4000 km

Z průběhu je jasně patrné, že úroveň výkonu výstupního předzesilovače nemá na chybovost příliš velký vliv. Nedošlo k významnému zlepšení pro žádnou výkonovou úroveň. Naopak tomu bylo u vstupního předzesilovače – tzv. boosteru. V simulaci byl zkoumán vliv výkonové úrovně zesilovače v pásmu -10 dBm až 20 dBm. V celém simulovaném pásmu byly naměřeny hodnoty v rozsahu  $10^{-25}$  až  $10^{-40}$ . Hodnoty chybovosti jsou v celém měřeném výkonovém pásmu velmi dobré. I přesto je nutné se v dalších simulacích na správné nastavení výkonu boosteru zaměřit. Pro zajímavost byl otestován vliv úrovně výkonu průběžných zesilovačů. Topologie zůstala nezměněna. Tento vliv je zanesen v následujícím grafu.

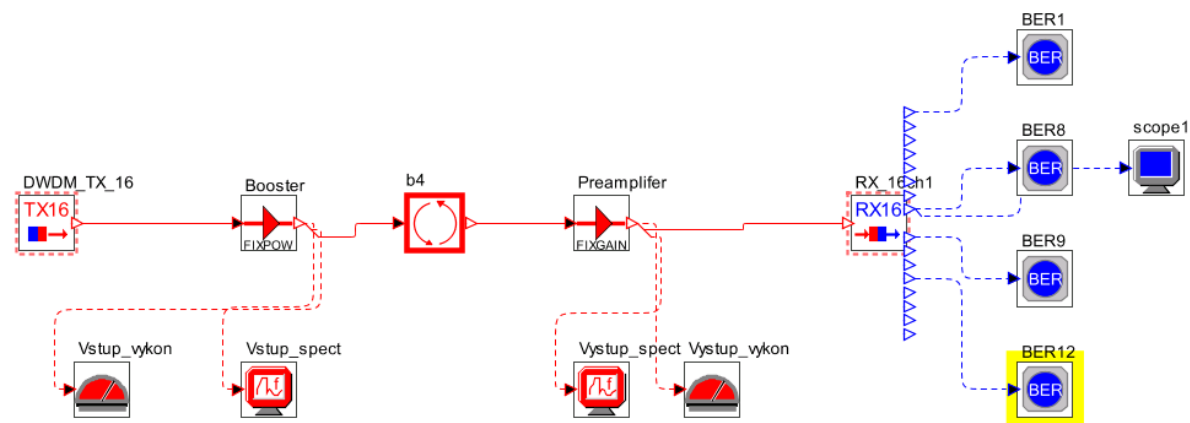


Graf č. 3 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro WDM systém délky 4000 km

Lze pozorovat, že pro větší výkon průběžných zesilovačů BER rychle klesá. Pro úroveň výkonu 15 dBm bylo dosaženo limitní chybovosti prostředí.

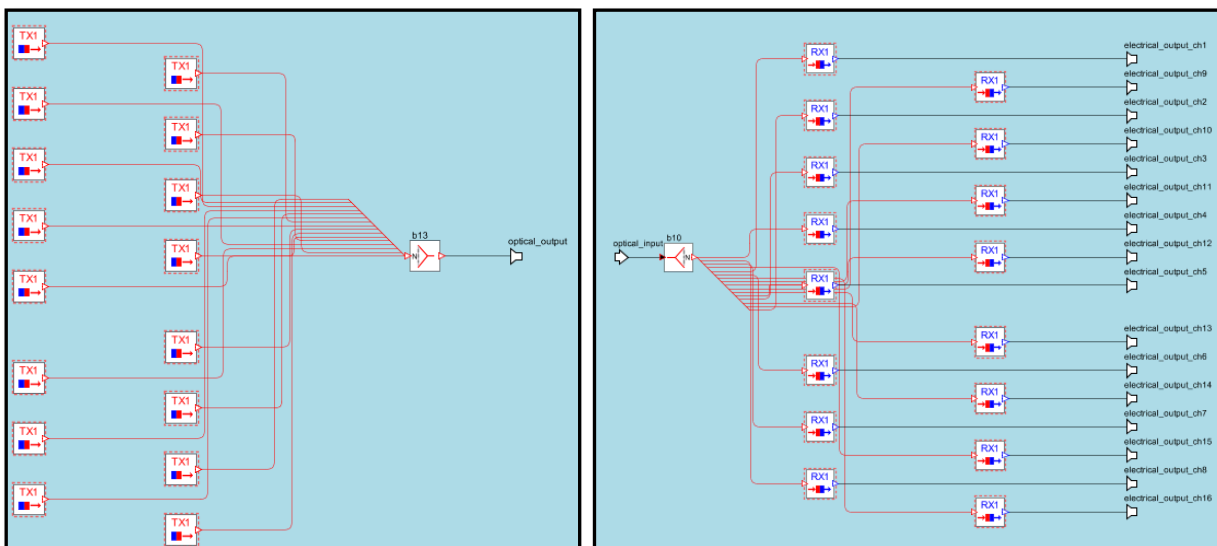
### 4.3 Simulace DWDM systému

V následující kapitole je navržen 16 kanálový DWDM systém. Kapacita jednotlivých kanálů je 10 Gb/s a celková kapacita přenosového systému je tedy 160 Gb/s. Střední frekvence byla nastavena na 193,1 THz a kanálová rozteč mezi jednotlivými kanály je 100 GHz. Výkon laseru byl nastaven na hodnotu 1 mW. Modulace byla použita stejná jako v předchozích simulacích, tedy amplitudová NRZ modulace. Disperze byla post-kompenzována pomocí FBG na nulovou hodnotu.



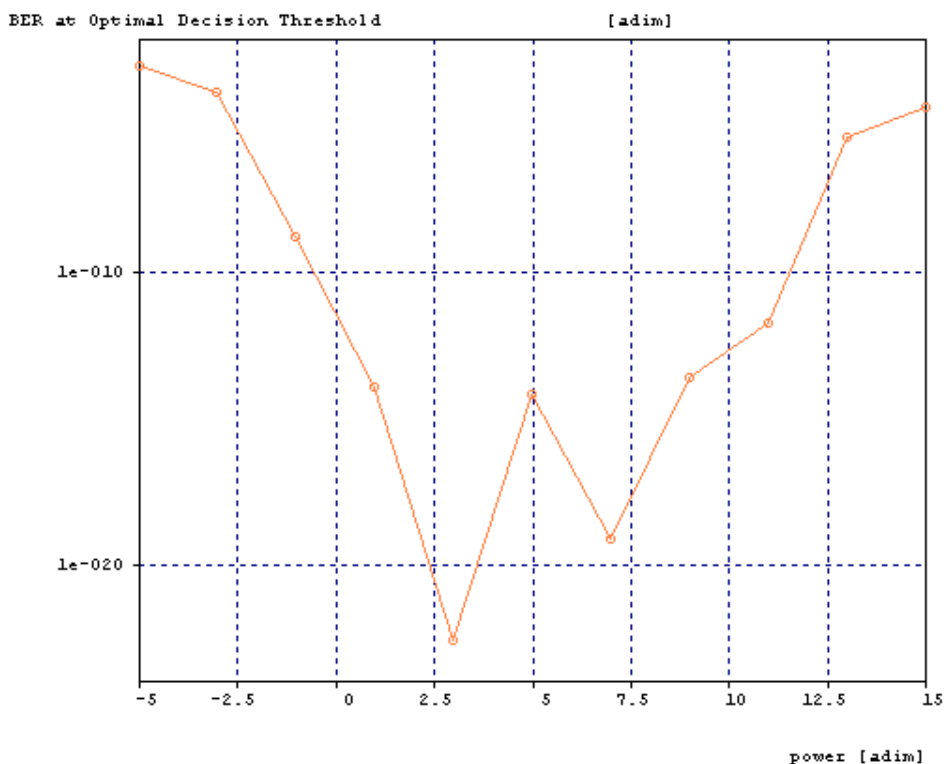
Obrázek č. 13 – Topologie 160 Gb/s DWDM systému

Všech 16 vysílacích kanálů je sloučeno do modulu TX16. Pro příjem signálu byl použit modul RX16. Skladba je na následujícím obrázku.



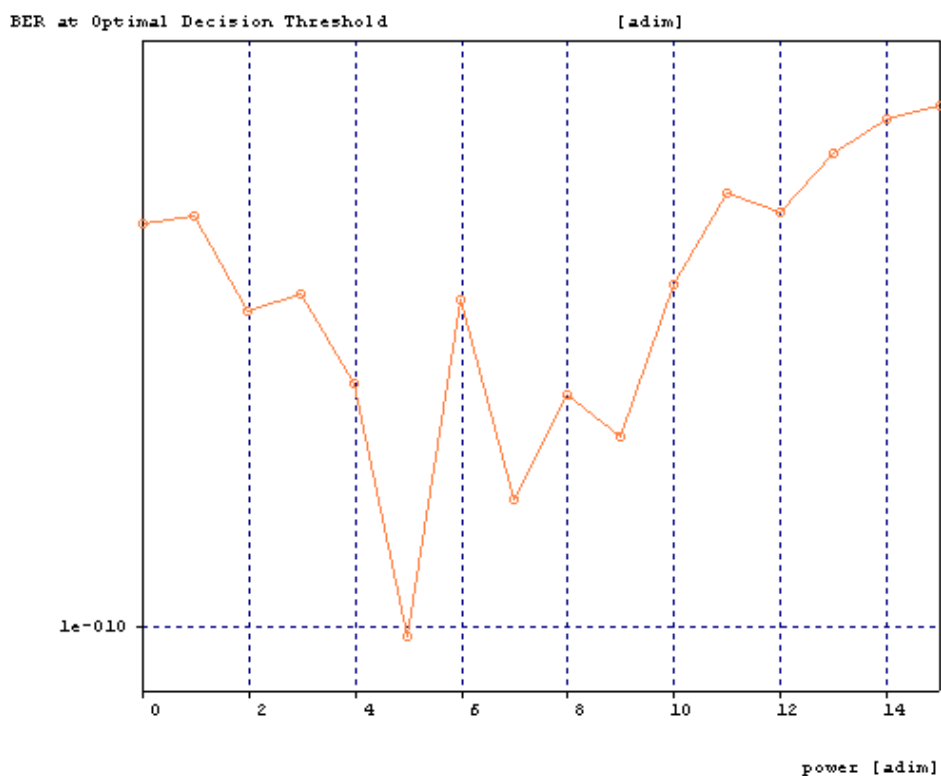
Obrázek č. 14 – Schéma modulů TX16 (vlevo) a RX16 (vpravo)

Simulovaný systém se již podobá reálným optickým spojům, jelikož se jedná o složitější topologii s násobně větší přenosovou kapacitou. Důraz je kladen na pečlivé nastavení výkonových úrovní všech zastoupených zesilovačů, protože díky většímu počtu kanálů a menší kanálové rozteči se může negativně projevit vliv FWM. Celý systém je také náchylnější na šum. V první řadě byl otestován vliv úrovně výkonu průběžných zesilovačů. Byl zkoumán pro dvě délky optického spoje – pro 800 km a pro 1600 km. Uvedené vzdálenosti odpovídají kratším reálným podmořským optickým spojům. Například optický spoj mezi Jamajkou a Kajmanskými ostrovy dosahuje délky 860 km. Delší zvolenou vzdálenost lze přirovnat k optickému spoji mezi Marokem a Francií o celkové délce 1634 km [8]. Hodnoty předzesilovače a boosteru byly nastaveny na úroveň výkonu 5 dBm. Pro oba spoje bylo použito klasické SMF vlákno a disperze byla opět plně kompenzována pomocí FBG. Pro spoj o délce 800 km byly testovány hodnoty úrovně výkonu v rozsahu -5 dBm až 15 dBm. Pro delší spoj délky 1600 km bylo otestováno pásmo úrovně výkonu 0 dBm až 15 dBm. Grafy jsou vyobrazeny níže.



Graf č. 4 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro DWDM systém délky 800 km

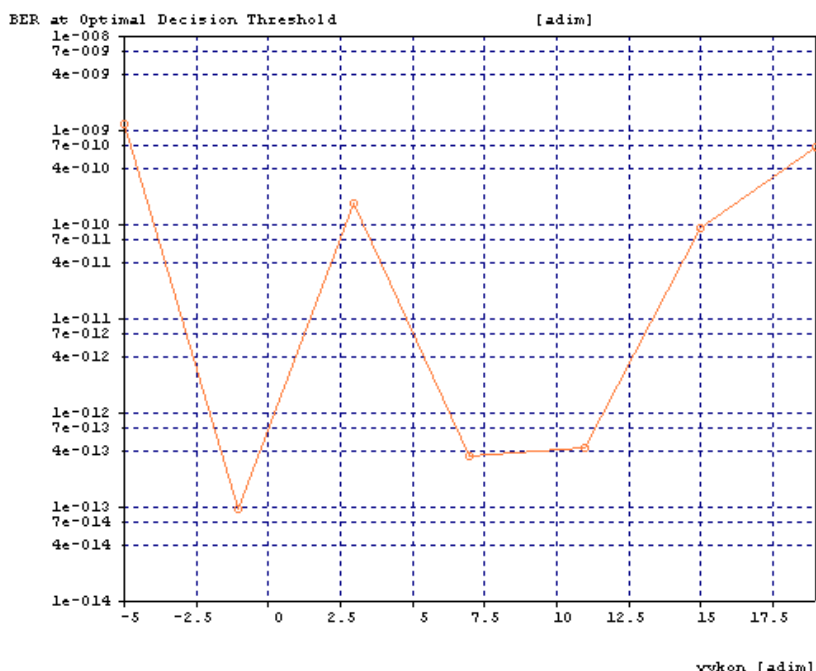




Graf č. 5 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro DWDM systém délky 1600 km

Lze si povšimnout značného vzrůstu celkové chybovosti. Pro delší spoj se chybovost zhoršila o několik řádů v rozsáhlé části výkonového pásma. Nejlepší dosažené hodnoty u každého spoje se liší o více než 10 řádů. Zajímavý je fakt, že lze pozorovat jistou korelaci mezi oběma výstupy. Nejlepších hodnot bylo dosaženo v pásmu úrovně výkonu 3 až 6 dBm. Jako další zajímavost lze pozorovat výraznější závislost na úrovni výkonu pro 800 km spoj. Chybovost se liší o více než 10 řádů, zatímco u spoje délky 1600 km se chybovost mění o 5 řádů.

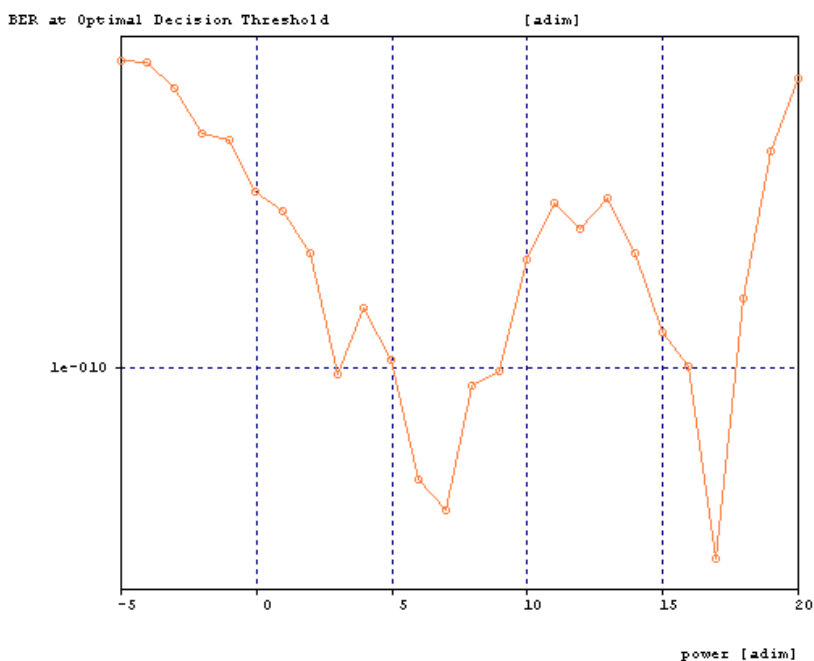
V dalším kroku je provedena výkonová analýza předzesilovače pro spoj délky 1600 km. Topologie zůstává zcela nezměněna. Úroveň výkonu průběžných zesilovačů byla nastavena na 5 dBm.



Graf č. 6 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu předzesilovače pro DWDM systém délky 1600 km

I když hodnoty velmi kolísají, podařilo se docílit lepších výsledků. Chybovost klesla v některých případech o 3 řády, jde tedy o výrazné zlepšení. Pro všechny kanály bylo docíleno nejlepší chybovosti pro výkonové úrovně předzesilovače v rozsahu 4 až 8 dBm. Bylo potvrzeno, že nastavení výkonů v optické síti hraje velkou roli. Pečlivějším výkonovým nastavením už nelze docílit markantního zlepšení. Je třeba se zaměřit na další faktory přenosu.

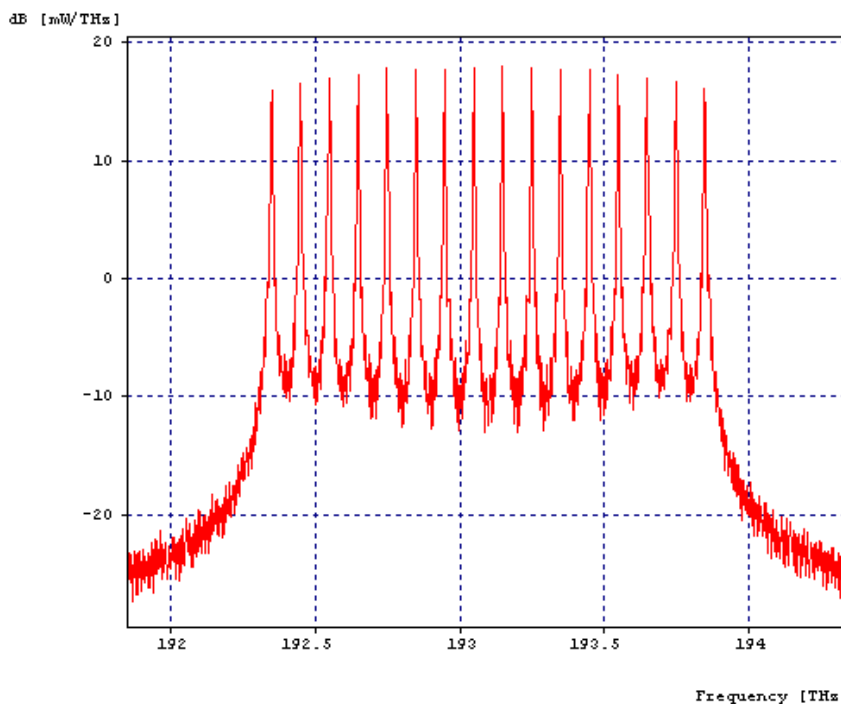
V další simulaci bylo nahrazeno klasické SMF vlákno. Místo něj bylo použito vlákno NZDSF (Non-zero dispersion-shifted fiber) s nižší disperzí. Pro vlnovou délku 1550 nm přibližně 4 ps/nm/km [32]. Díky této vlastnosti se vlákno používá v DWDM systémech. Podle výsledků předchozí simulace, byla úroveň výkonu předzesilovače přenastavena na 7 dBm. Disperze byla zcela kompenzována pomocí FBG. Opět byla testována závislost chybovosti na výkonu průběžných zesilovačů pro spoj délky 1600 km.



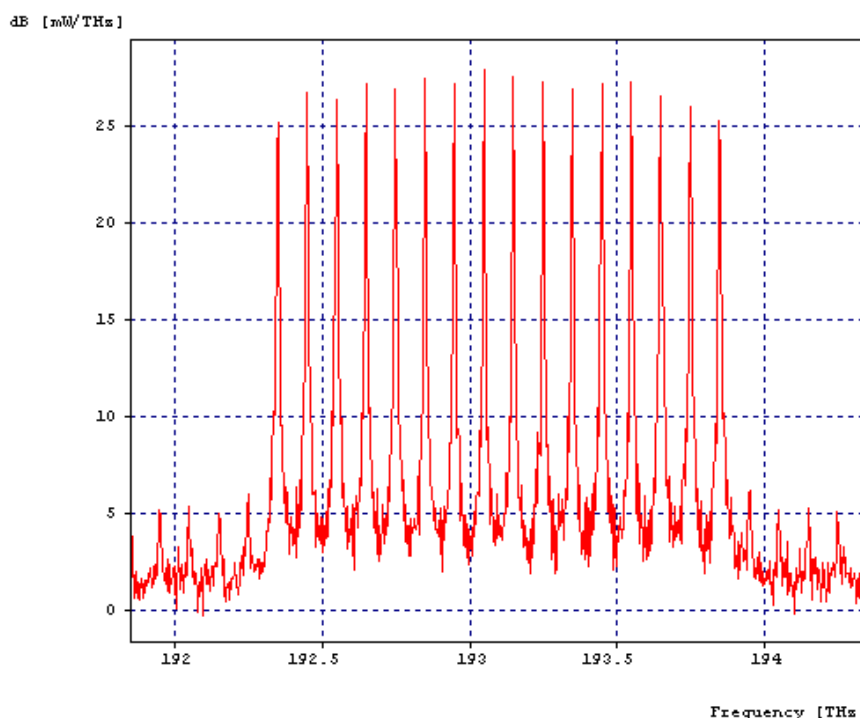
Graf č. 7 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro DWDM systém délky 1600 km s NZDSF vláknem

Z grafu je patrné, že došlo k zlepšení chybovosti o 3 řády. Volba vlákna při plné disperzní kompenzaci má tedy velký vliv na chybovost systému. Nejlepší hodnoty bylo dosaženo pro úroveň výkonu 7 dBm.

Vstupní a výstupní spektrum pro nejlepší dosaženou hodnotu je na následujícím obrázku.



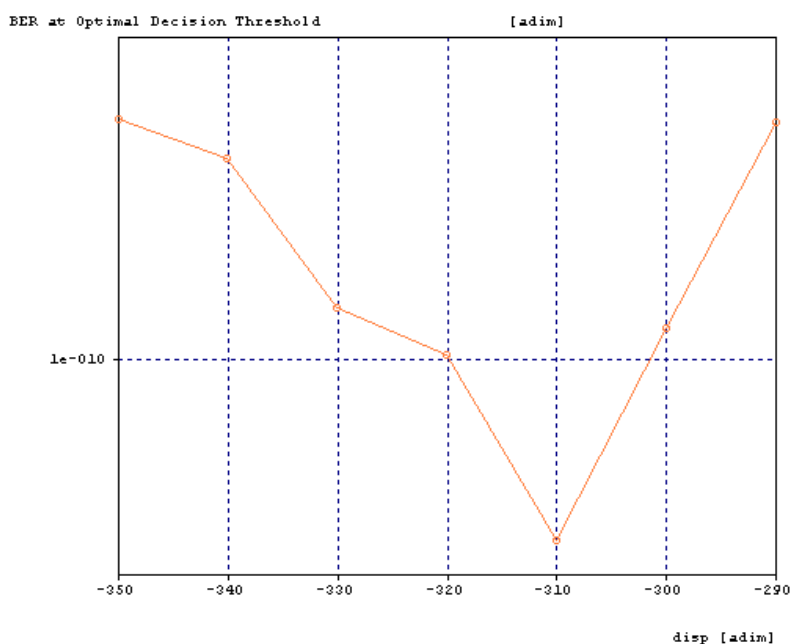
Obrázek č. 15 – Vstupní spektrum pro DWDM systém délky 1600 km s NZDSF vláknem



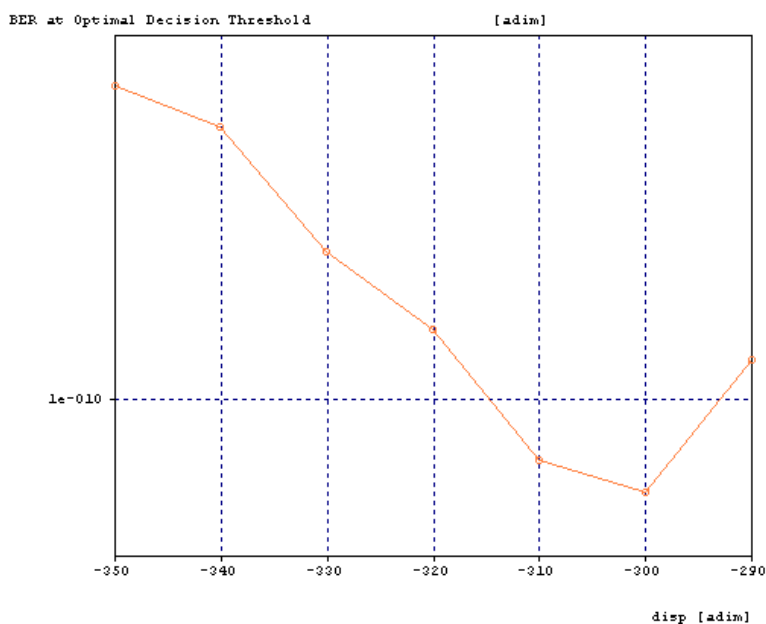
Obrázek č. 16 – Výstupní spektrum pro DWDM systém délky 1600 km s NZDSF vláknem

U výstupního spektra si lze povšimnout značného zkreslení. Jednotlivé kanály nedosahují stejných výkonových úrovní. To je způsobeno interakcí užitečných kanálů s intermodulačními produkty FWM. Tyto interakce způsobují lehké přeslechy. Ve spektru se také objevuje šum, jehož zdrojem jsou zejména zesilovače.

V poslední části byl testován vliv míry kompenzace disperze. Topologie systému byla ponechána nezměněna. Na každý 80km úsek SMF vlákna připadá jeden FBG modul, u kterého byla v předchozí simulaci nastavena hodnota disperze na -320 ps/nm. V simulaci následující se tato hodnota mění v rozsahu od -350 ps/nm do -290 ps/nm. Nedochozí tedy k absolutní kompenzaci disperze, a díky tomu se sníží vliv FWM na užitečný signál. Hodnota úrovně výkonu boosteru i průběžných zesilovačů byla nastavena na 7 dBm. Závislost chybovosti na míře kompenzace disperze je vynesena níže.



Graf č. 8 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace DWDM systému délky 1600 km s NZDSF vláknem pro kanál 9



Graf č. 9 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace DWDM systému délky 1600 km s NZDSF vláknem pro kanál 12

Z grafů pro oba kanály je patrné, že nejlepší chybovosti bylo dosaženo pro hodnotu -310 ps/nm. Zajímavý je fakt, že v případě kompenzace větší než na nulu, dochází k razantnímu zhoršení chybovosti. Nejlepší variantou se tedy jeví, kompenzovat disperzi na kladné hodnoty blízké nule.

Jak bylo uvedeno, dalším důležitým parametrem, který výrazně ovlivňuje kvalitu přenosu v topologii, je šum zesilovačů. Dosud byly všechny simulace provedeny se zesilovači, které mají hodnotu šumového čísla 4,5 dB. Fyzikálně limitní dosažitelná hodnota šumového čísla pro zesilovač EDFA je 3 dB. Pomocí další simulace je zkoumán vliv šumu průběžných zesilovačů na celkovou chybovost systému. Topologie zůstala nezměněna a všechny hodnoty byly nastaveny podle předchozí simulace. V následující tabulce jsou zaneseny hodnoty chybovosti optického spoje pro dvě šumová čísla. Pro zajímavost je v posledním sloupci zaznamenáno, jaké chybovosti by bylo dosaženo v případě úplného zanedbání šumu průběžných zesilovačů.

Tabulka č. 4 – Chybovost BER pro DWDM systém délky 1600 km v závislosti na šumu průběžných zesilovačů

	Šumové číslo [dB]		
	4,5	3,2	Bez šumu
Kanál 9	$0,11 \cdot 10^{-12}$	$0,18 \cdot 10^{-15}$	$0,99 \cdot 10^{-40}$
Kanál 12	$0,12 \cdot 10^{-11}$	$0,79 \cdot 10^{-12}$	$0,99 \cdot 10^{-40}$

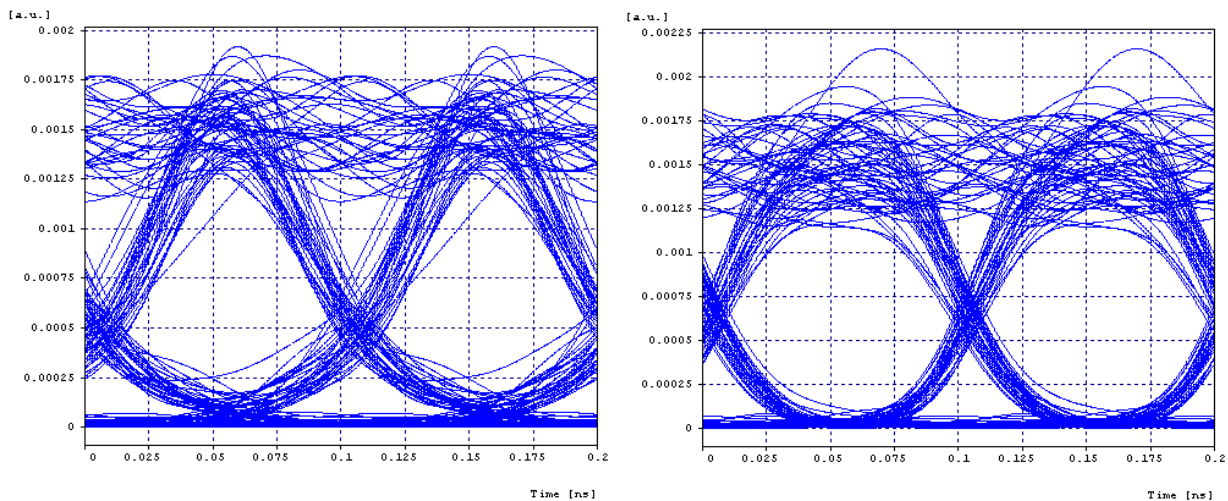
Z hodnot chybovosti v tabulce plyne velmi zajímavé zjištění. V případě zanedbání šumu průběžných zesilovačů, lze dosáhnout limitní chybovosti prostředí. Šum je tedy hlavní příčinou degradace signálu. Obzvláště na velké vzdálenosti, kde je počet zesilovačů mnohem vyšší. Lze tedy prohlásit, že u takto navrhnutého simulovaného spoje nelze dosáhnout výrazně lepších výsledků než je hodnota  $0,18 \cdot 10^{-16}$ .

Nakonec byl na celkovou chybovost systému testován vliv kanálové rozteče. V případě zmenšování kanálového rozestupu chybovost značně roste. Konkrétní výsledky jsou zaneseny v následující tabulce.

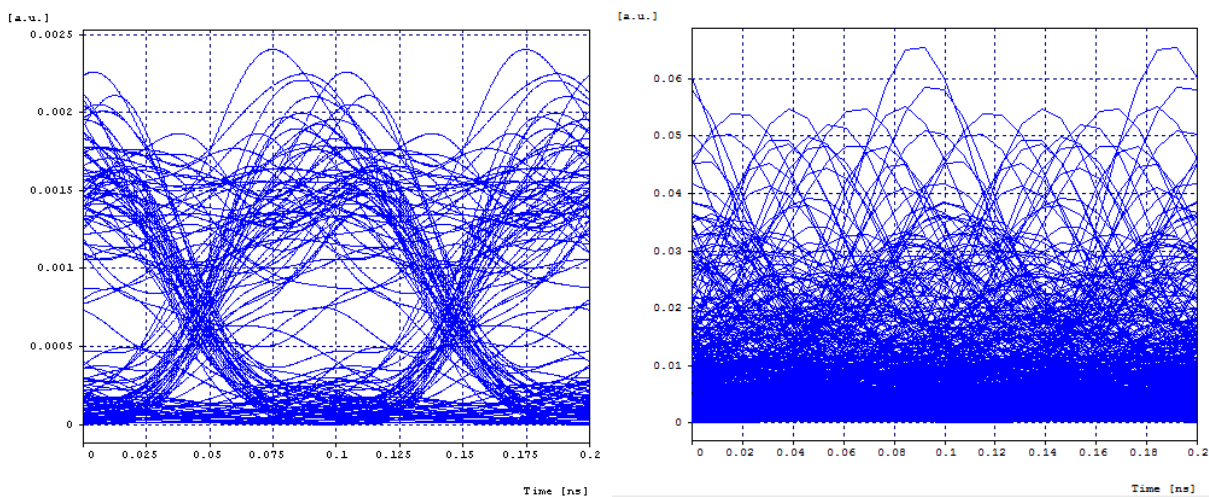
Tabulka č. 5 – Chybovost BER pro DWDM systém délky 1600 km v závislosti na rozestupu kanálů

	Kanálová rozteč [GHz]			
	100	50	25	12,5
Kanál 9	$0,18 \cdot 10^{-15}$	$0,12 \cdot 10^{-12}$	$0,54 \cdot 10^{-5}$	$0,23 \cdot 10^{-1}$
Kanál 14	$0,37 \cdot 10^{-12}$	$0,49 \cdot 10^{-12}$	$0,67 \cdot 10^{-3}$	$0,23 \cdot 10^{-1}$

Lze si povšimnout zajímavé skutečnosti. Rozdíl v chybovosti pro kanálovou rozteč 100 GHz a 50 GHz není tak výrazný. Chybovost se dokonce pro kanál 14 řádově nezměnila. Pro další dvě hodnoty kanálového rozestupu 25 GHz a 12,5 GHz se však chybovost rapidně zvýšila. Pro hodnotu 12,5 GHz bylo dokonce dosaženo limitní hodnoty chybovosti. V prostředí OptSim horší hodnotu nasimulovat nelze.



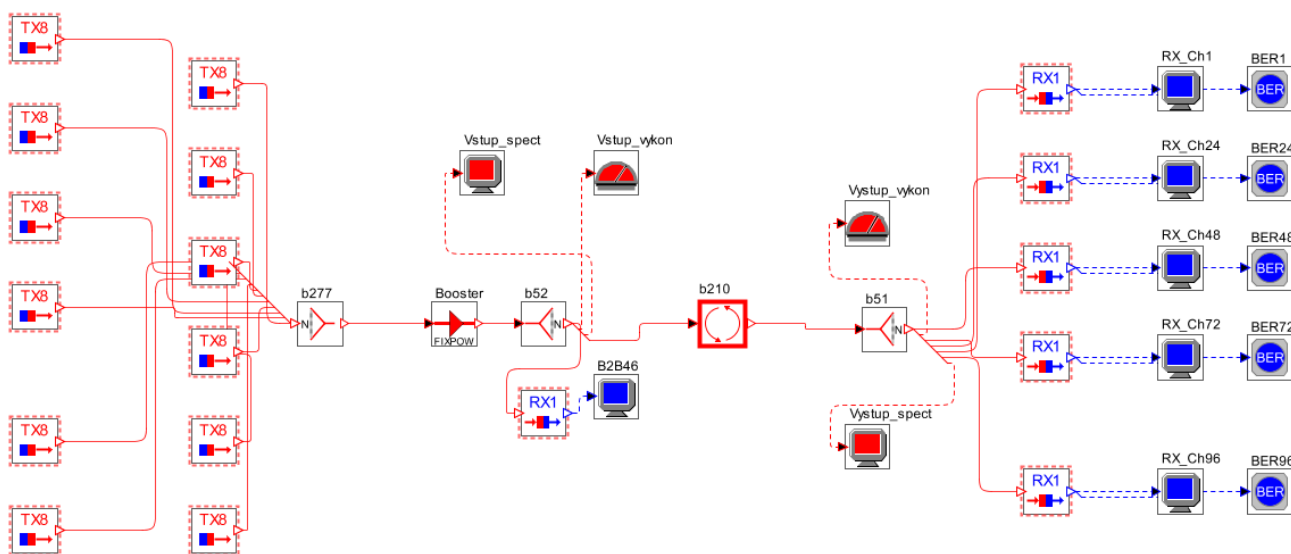
Obrázek č. 17 – Diagram oka pro kanálovou rozteč 100 GHz (vlevo) a 50 GHz (vpravo), kanál 14



Obrázek č. 18 – Diagram oka pro kanálovou rozteč 25 GHz (vlevo) a 12,5 GHz (vpravo), kanál 14

## 4.4. Simulace vysokokapacitních DWDM systémů

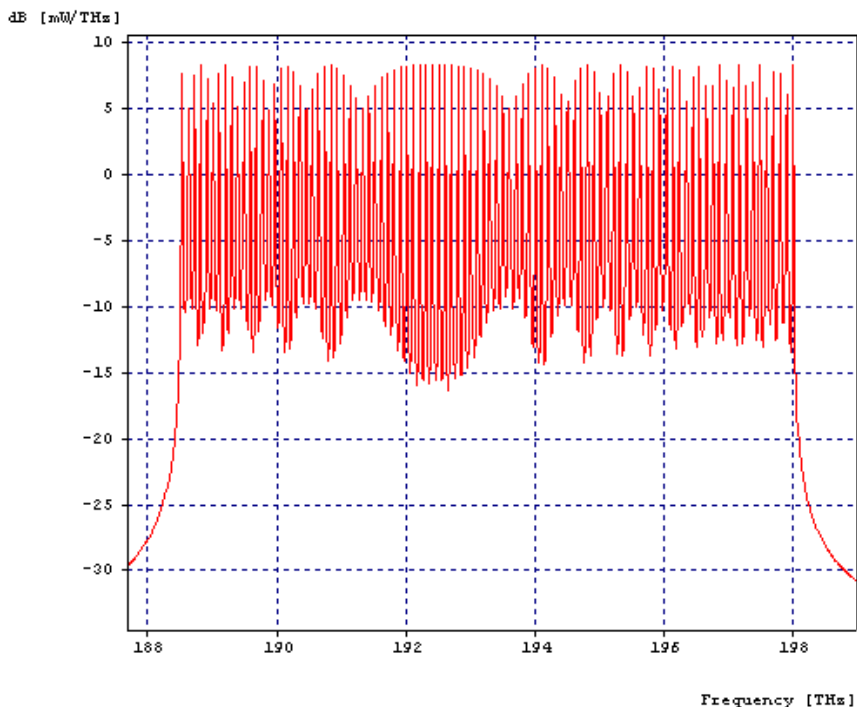
V následující kapitole je představeno několik systémů, které se vyznačují vysokou přenosovou kapacitou. V první řadě jde o 96kanálový systém o celkové přenosové kapacitě 960 Gb/s. Systém vznikl z předchozího 160Gb/s systému. Kanálová rozteč zůstala 100 GHz. Střední frekvence systému byla ponechána na 193,1 THz. Použita byla opět NRZ amplitudová modulace. Výkon laseru byl nastaven na hodnotu 1 mW. Pro přenos bylo použito 80 km dlouhé vlákno NZDSF o hodnotě disperze 4 ps/nm/km pro vlnovou délku 1500 nm. Disperze nebyla zcela kompenzována. Hodnota FBG modulu byla nastavena na -310 ps/nm. Celá topologie systému je zobrazena na následujícím obrázku.



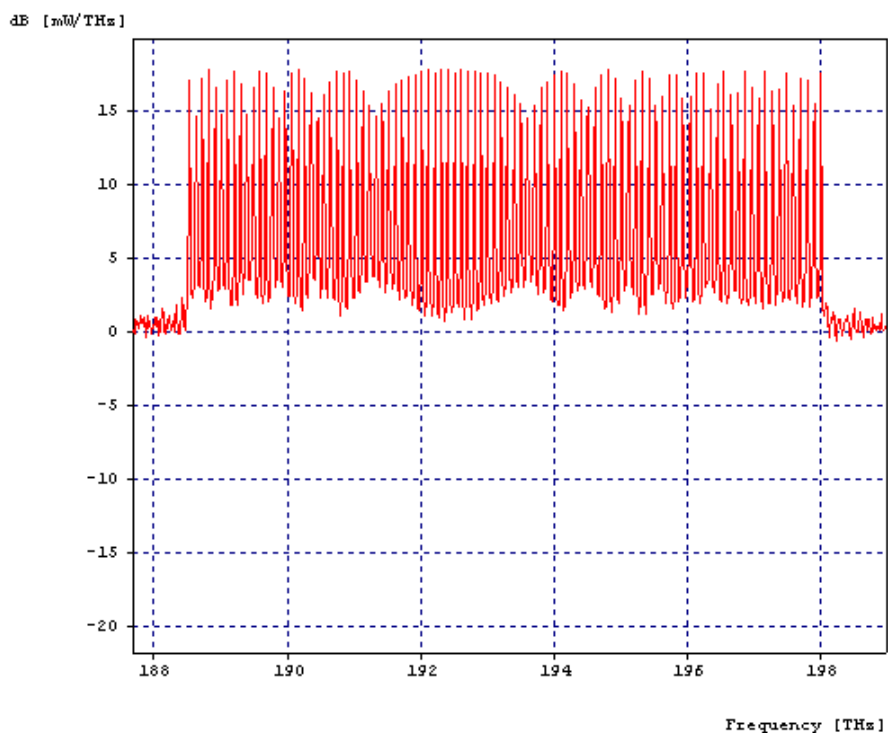
Obrázek č. 19 – Topologie 960Gb/s DWDM systému



Úroveň výkonu průběžných zesilovačů byla nastavena na 7 dBm. Nejprve byly provedeny simulace pro dvě délky optického spoje. Pro délku 800 km byla naměřena chybovost  $0,16 \cdot 10^{-12}$ . Pro vzdálenost 1600 km byla tato hodnota  $0,21 \cdot 10^{-6}$ . Lze pozorovat značný pokles, který je způsoben velkým množstvím kanálů. Spektrum systému je zobrazeno níže.

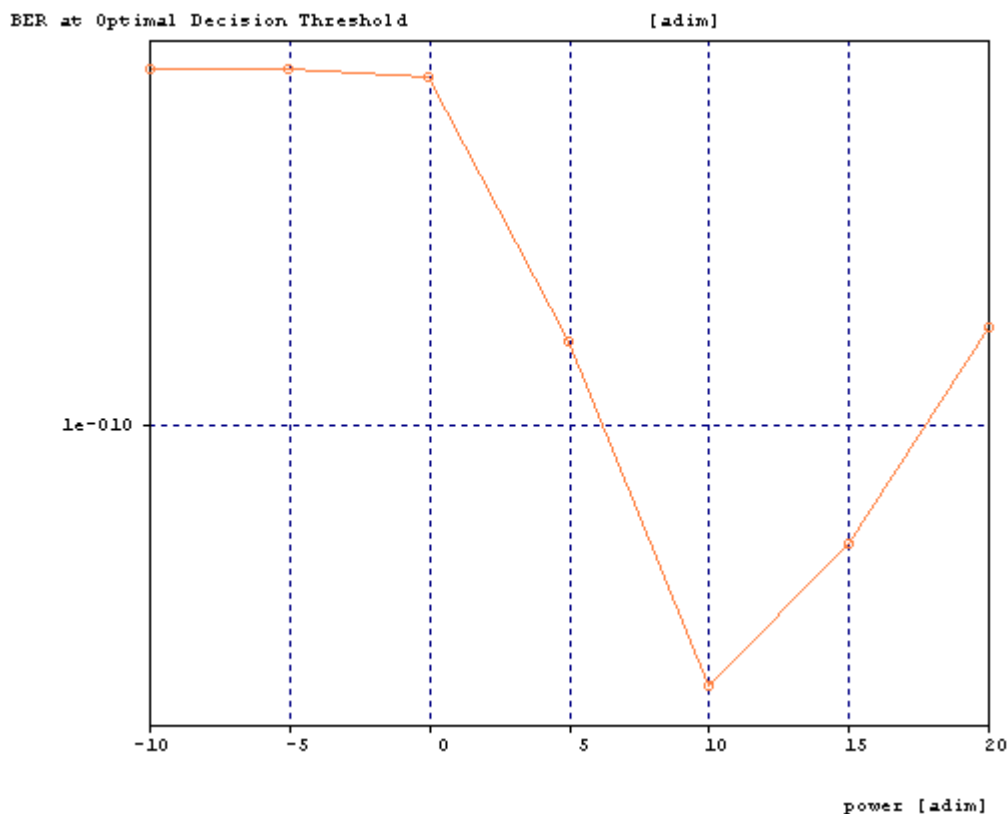


Obrázek č. 20 – Vstupní spektrum 960Gb/s DWDM systému délky 800 km



Obrázek č. 21 – Výstupní spektrum 960Gb/s DWDM systému délky 800 km

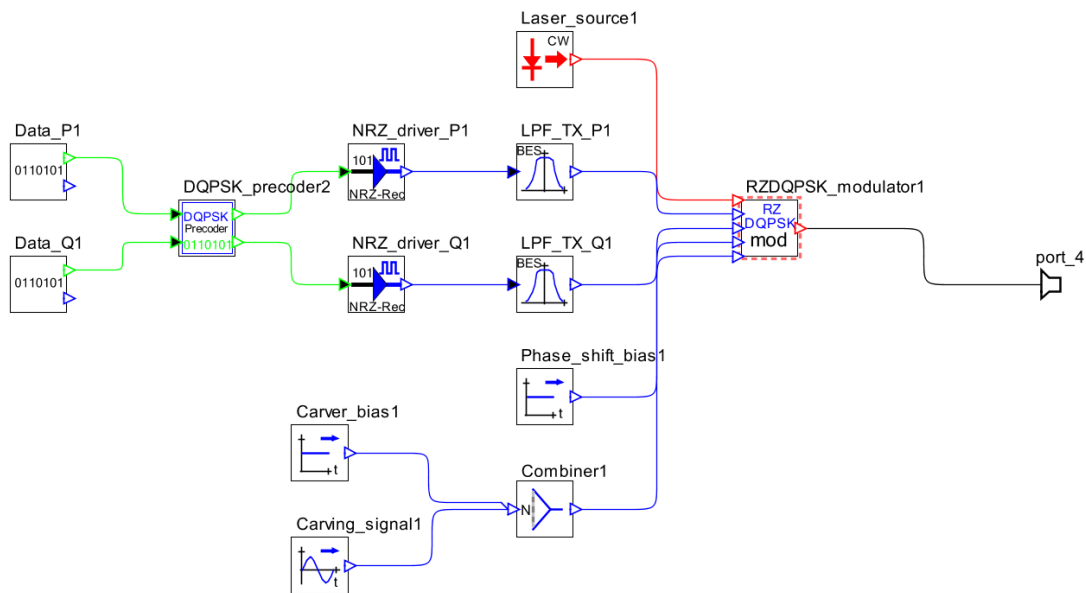
Je možné si povšimnout, že nedošlo k výrazné změně tvaru spektra. Hlavní roli hraje vzniklý šum. OSNR se výrazně snížilo. V další simulaci byla provedena analýza úrovně výkonu průběžných zesilovačů. Kvůli výpočetní náročnosti byla simulace provedena pouze pro kratší délku spoje. Výsledek simulace je zanesen v následujícím grafu.



Graf č. 10 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro 960Gb/s DWDM systém délky 800 km

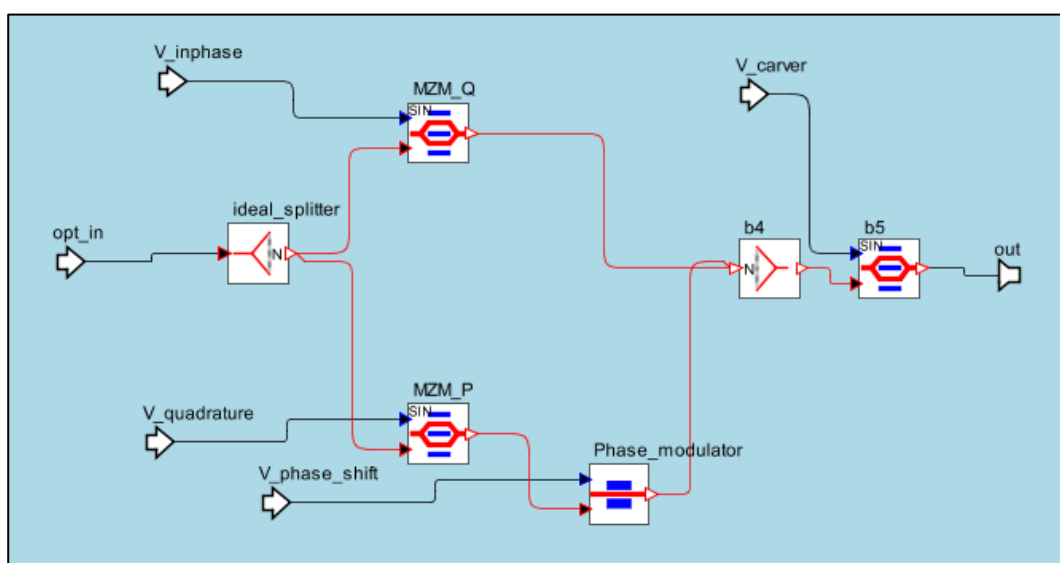
Nejlepší hodnoty bylo dosaženo pro výkonovou úroveň 10 dBm. Při té bylo dosaženo chybovosti  $0,94 \cdot 10^{-16}$ . Došlo tedy k výraznému zlepšení o 4 řády. Dalšího řádového zlepšení je velmi těžké dosáhnout, jelikož hlavní roli v degradaci signálu hraje šum zesilovačů. Pro zajímavost byla provedena ještě jedna simulace, při které byl šum průběžných zesilovačů zanedbán. Výsledná hodnota chybovosti byla naměřena  $0,99 \cdot 10^{-40}$ , což je limitní hodnota v prostředí OptSim. Šum nemůže z hlediska fyzikálních principů klesnout na hodnoty nižší než 3 dB na jeden zesilovač. Proto je vhodné zaměřit se na jiný typ modulace. Protože amplitudová modulace není ideálním kandidátem pro vysokorychlostní přenosy na dlouhé vzdálenosti, byla v následující simulaci použita fázová modulace, konkrétně RZ-DQPSK (Return-to-zero-Differential Quadrature Phase-Shift Keying).

Modulace moduluje dva bity na symbol, takže symbolová rychlost je poloviční oproti rychlosti bitové. Hlavními výhodami jsou menší náchylnost na šum a lepší odolnost vůči chromatické disperzi. Modulace se jeví ideální pro použití na velké vzdálenosti. Využívá se ve 40Gb/s vysílačích. Schéma takového vysílače v prostředí OptSim je na následujícím obrázku.



Obrázek č. 22 – Schéma RZ-DQPSK vysílače

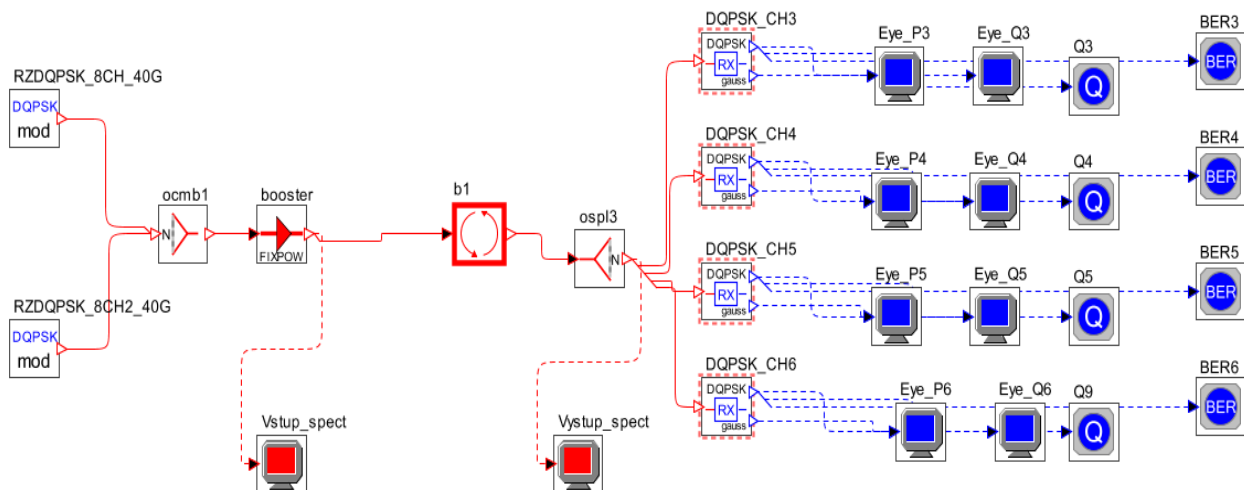
Vysílač se skládá ze dvou datových generátorů o bitové rychlosti 20 Gb/s. Jako zdroj optického signálu je použit CW Lorentzian laser. Dále následuje prekodér, NRZ ovladač, Besselův filtr a generátory elektrického signálu pro fázový modulátor, který je zastoupen v bloku RZDQPSK\_modulator1. Složení modulátoru je zobrazeno níže.



Obrázek č. 23 – Schéma RZ-DQPSK modulátoru

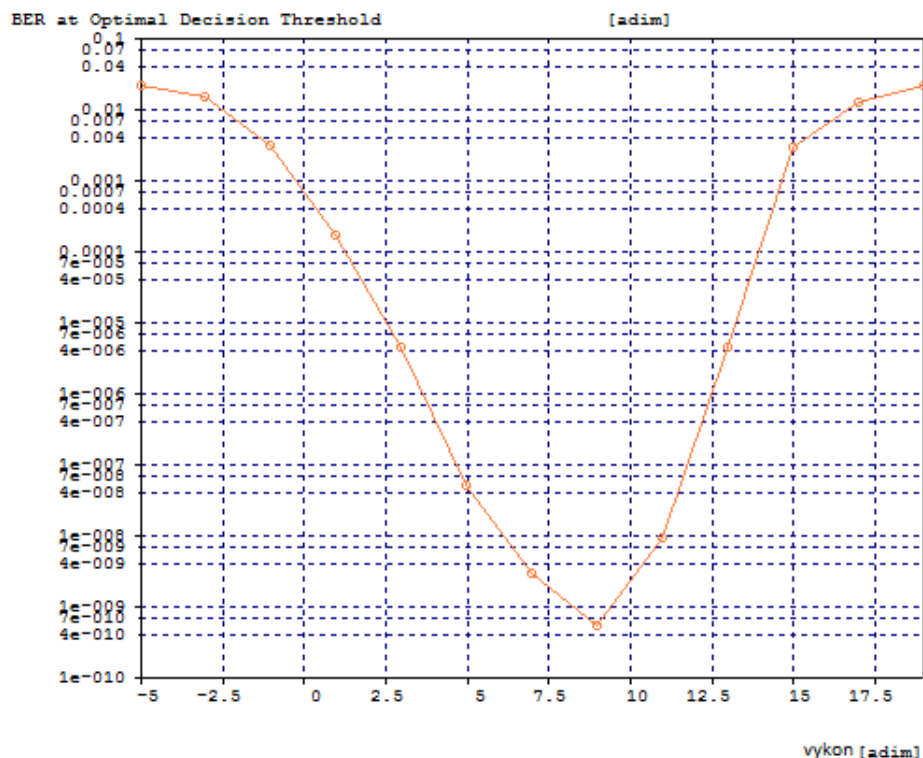
Modulátor se skládá ze dvou paralelních MZM modulů. MZM zajišťují posun fáze o násobky  $\pi/4$  v závislosti na vstupních datech.

Simulovaný systém se skládá z 16 takto vytvořených vysílačů o přenosové rychlosti 40 Gb/s. Celková přenosová rychlost systému je tedy 640 Gb/s. Rozestup mezi jednotlivými kanály je 50 GHz. Pro přenos bylo zvoleno 80 km dlouhé NZDSF vlákno o hodnotě disperze 4 ps/nm/km pro vlnovou délku 1500 nm. Disperze byla zcela post-kompenzována pomocí FBG. Celá topologie systému je na následujícím obrázku.

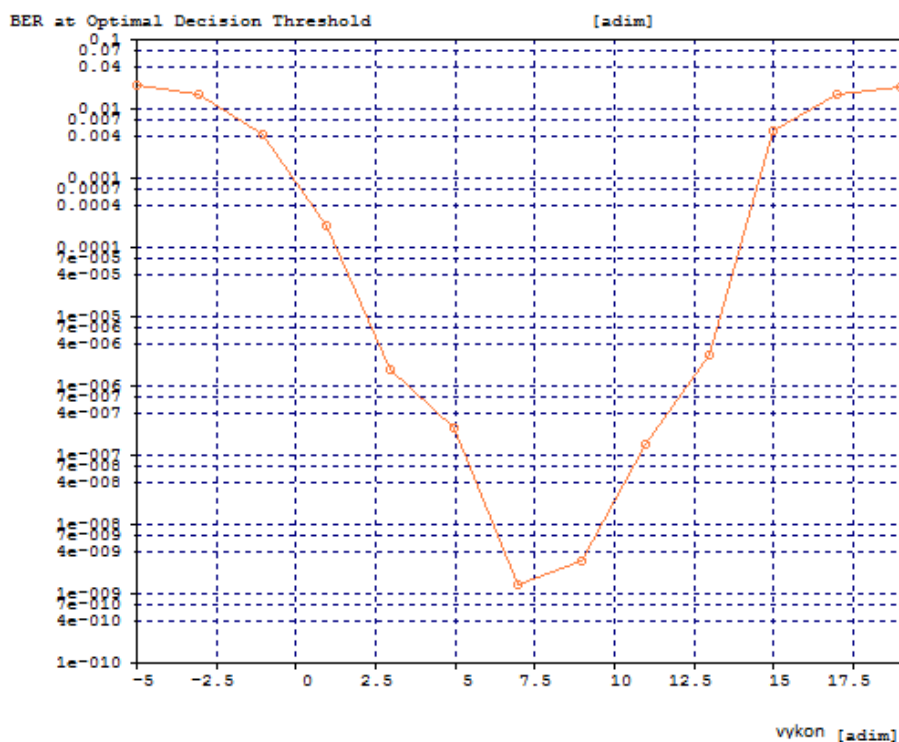


Obrázek č. 24 – Schéma 640Gb/s DWDM systému založenou na RZ-DQPSK modulaci

Jako první byla provedena analýza úrovně výkonu průběžných zesilovačů. Pro analýzu byla nastavena délka spoje na 1600 km. Závislost chybovosti jednotlivých kanálů je vynesena níže.



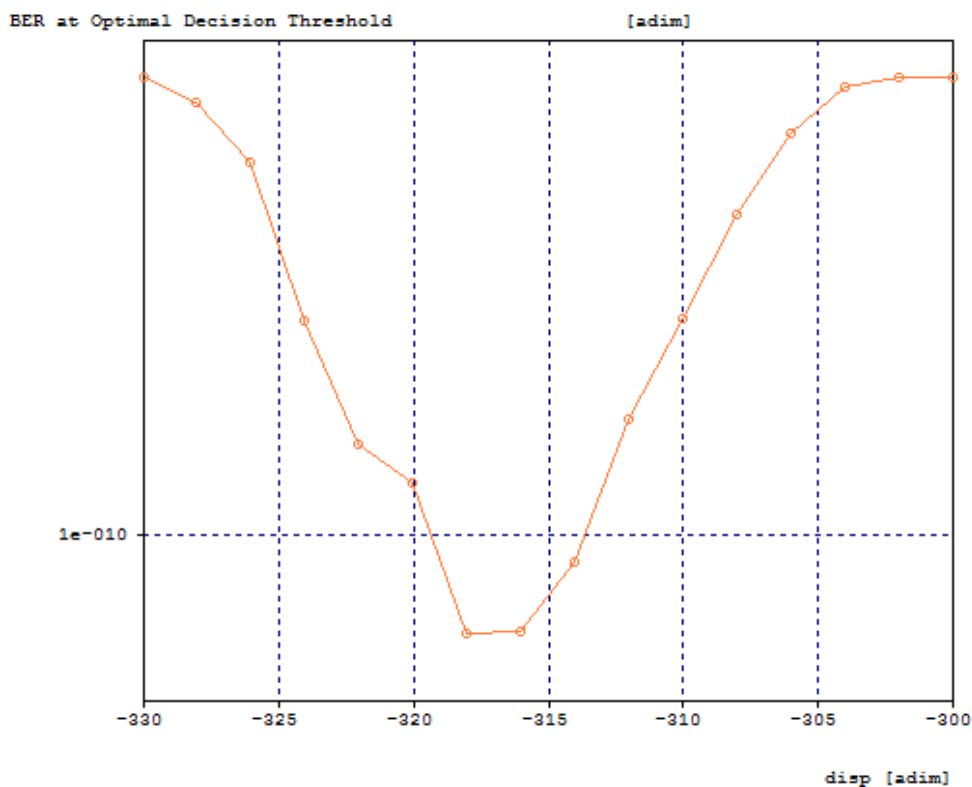
Graf č. 11 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 4



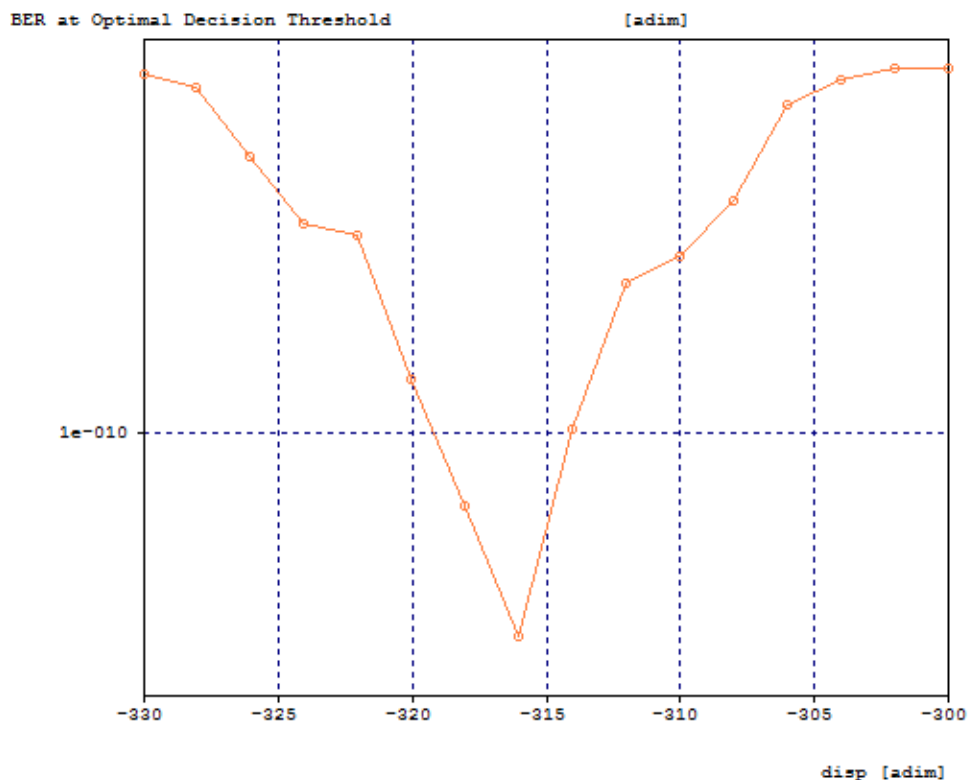
Graf č. 12 – Závislost chybovosti BER na úrovni výkonu průběžných zesilovačů pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 5

Z výše uvedených závislostí lze snadno vyčíst, že nejlepší hodnoty chybovosti bylo dosaženo při úrovni výkonu 8 dBm. Celková chybovost systému se pohybovala u všech kanálů v rozmezí  $10^{-8}$  až  $10^{-10}$ . Jde o znatelné zlepšení oproti předchozímu systému založeném na amplitudové modulaci, kde chybovost dosahovala hodnot v řádu  $10^{-6}$ .

V dalším kroku byl testován vliv kompenzace disperze. Testovaný interval byl nastaven v rozsahu od -330 ps/nm do -300 ps/nm, přičemž úplná kompenzace nastane při hodnotě -320 ps/nm. Úroveň výkonu zesilovačů byla nastavena podle předchozí simulace na hodnotu 8 dBm.



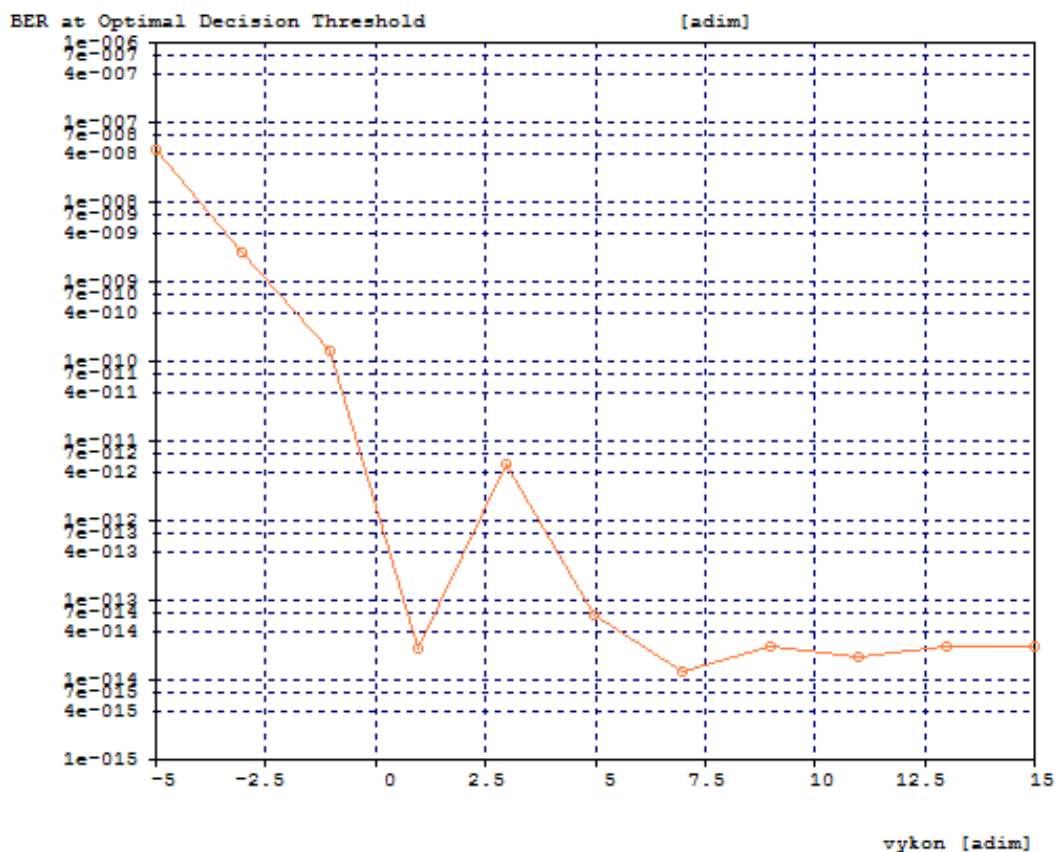
Graf č. 13 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 4



Graf č. 14 – Závislost chybovosti BER na míře disperzní kompenzace pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 5

Nejlepší chybovosti bylo dosaženo pro hodnotu disperze -316 ps/nm. Došlo k velmi výraznému zlepšení přenosu systému. Pro kanál 5 se snížila chybovost řádově na  $10^{-16}$ . Pro srovnání u předchozího simulovaného systému bylo dosaženo chybovosti v řádu  $10^{-12}$  při poloviční délce spoje. Modulace RZ-DQPSK se tedy ukázala jako mnohem vhodnější pro přenos dat na dlouhé vzdálenosti než zastaralá amplitudová modulace.

V dalším kroku výkonové analýzy byl testován vliv výkonu boosteru na systém. Hodnota úrovně výkonu průběžných zesilovačů byla ponechána na 8 dBm. Průběh je zobrazen na následujícím grafu.

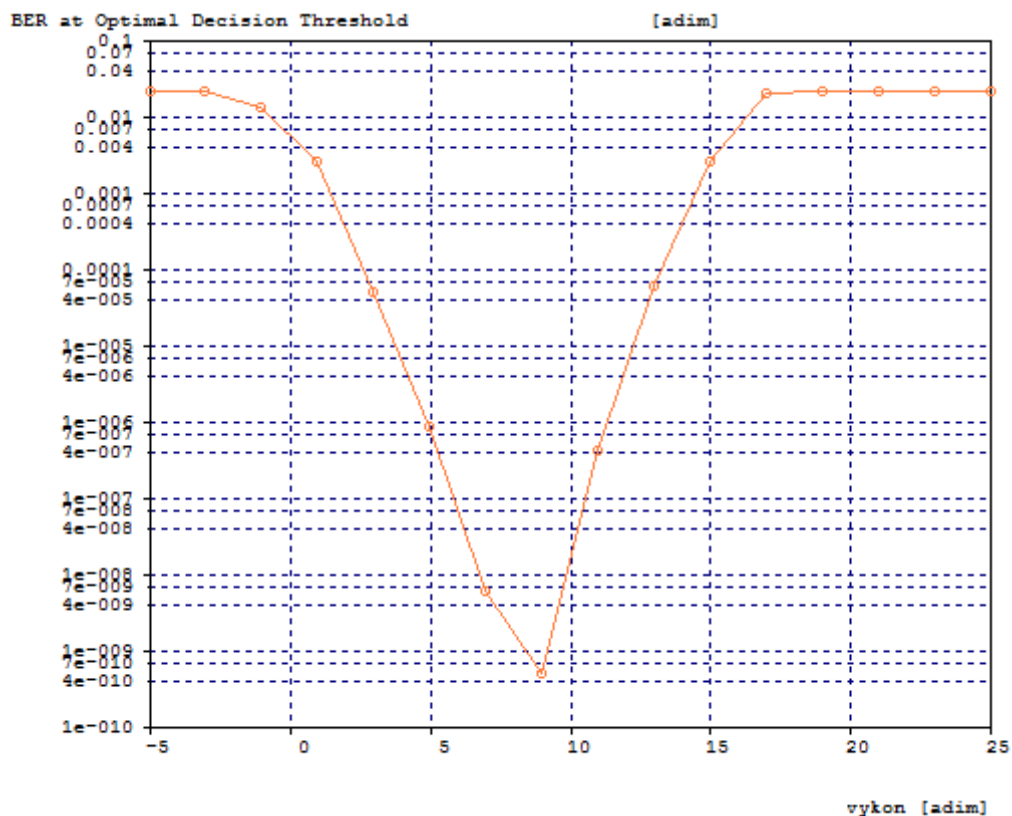


Graf č. 15 – Závislost chybovosti BER na výkonu boosteru pro 640 Gb/s DWDM systém délky 1600 km, kanál 5

Bylo ověřeno, že předchozí nastavení bylo správné. Pro hodnoty úrovně výkonu od 7 dBm systém dosahuje nejnižší chybovosti.

Jako poslední ověření správného výkonového nastavení byla délka optického spoje prodloužena na 2400 km. Hodnota FBG modulu zůstala nastavena na -316 ps/nm. Ostatní parametry zůstaly nezměněny.





Graf č. 16 – Závislost chybovosti BER na výkonu průběžných zesilovačů pro 640Gb/s DWDM systém délky 2400 km, kanál 5

Výše zobrazený graf výrazně koreluje s grafem č. 13. Nejlepší hodnoty chybovosti bylo dosaženo pro výkonovou úroveň 8 dBm. Pro tuto hodnotu chybovost klesla o 6 řádů, což je výrazné zhoršení, vezmeme-li v úvahu prodloužení optické trasy pouze o třetinu. Výsledky tedy potvrzují fakt, že nejvýraznější degradaci signálu způsobuje šum zesilovačů. Hodnota výkonu průběžných zesilovačů byla simulací ověřena a na výkony se není nutné v simulovaném systému dále zaměřit.

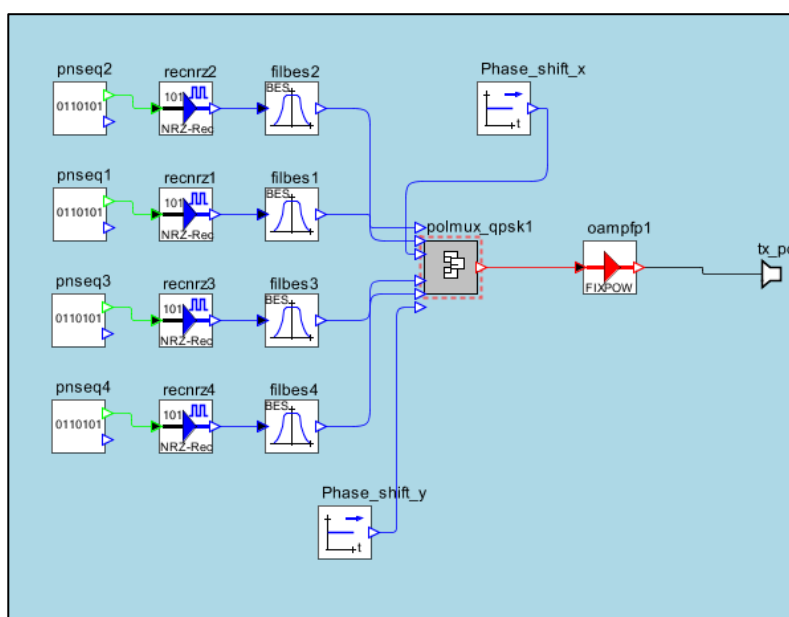
Počet zesilovačů lze snížit prodloužením regeneračních úseků přenosového vlákna. V následující části byly provedeny simulace pro rozdílné délky regeneračních úseků. Všechny dosavadní hodnoty byly naměřeny pro úsek dlouhý 80 km. Simulace byly prováděny pro další tři délky 50 km, 100 km a 160. Hodnota FBG byla přepočítána a nastavena na -197 ps/nm pro délku 50 km, -396 ps/nm pro 100 km a -635 ps/nm pro 160 km. Celková vzdálenost optické trasy byla 1600 km. Nejlepší dosažené výsledky jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka č. 6 – Chybovost BER pro 640Gb/s DWDM systém délky 1600 km v závislosti na délce regeneračního úseku

	Délka úseku [km]			
	50	80	100	160
Kanál 4	$0,55 \cdot 10^{-17}$	$0,62 \cdot 10^{-15}$	$0,68 \cdot 10^{-7}$	$0,23 \cdot 10^{-1}$
Kanál 5	$0,93 \cdot 10^{-15}$	$0,88 \cdot 10^{-14}$	$0,37 \cdot 10^{-10}$	$0,23 \cdot 10^{-1}$

Lze si povšimnout závislosti vzrůstu chybovosti na vzrůstající délce regeneračních úseků. Lepších hodnot bylo dosaženo pouze v případě zkrácení úseku na 50 km. Pro úsek délky 160 km bylo dosaženo limitní hodnoty prostředí OptSim. Simulace vyvrátila myšlenku, že méně zesilovačů v navržené optické trase způsobí zlepšení celkové chybovosti systému. Pro výsledné porovnání úsekových délek 50 km a 80 km byla celková délka optického spoje prodloužena na 2400 km. Pro úsek délky 50 km dosahovala chybovost řádově  $10^{-7}$ . Při porovnání této hodnoty s nejlepší hodnotou grafu č. 17 došlo ke zhoršení, neboť nejlepší dosažená hodnota chybovosti byla řádově  $10^{-10}$ . Z hlediska optimalizace simulovaného optického spoje se jako nejvýhodnější řešení jeví použití průběžných zesilovačů každých 80 km.

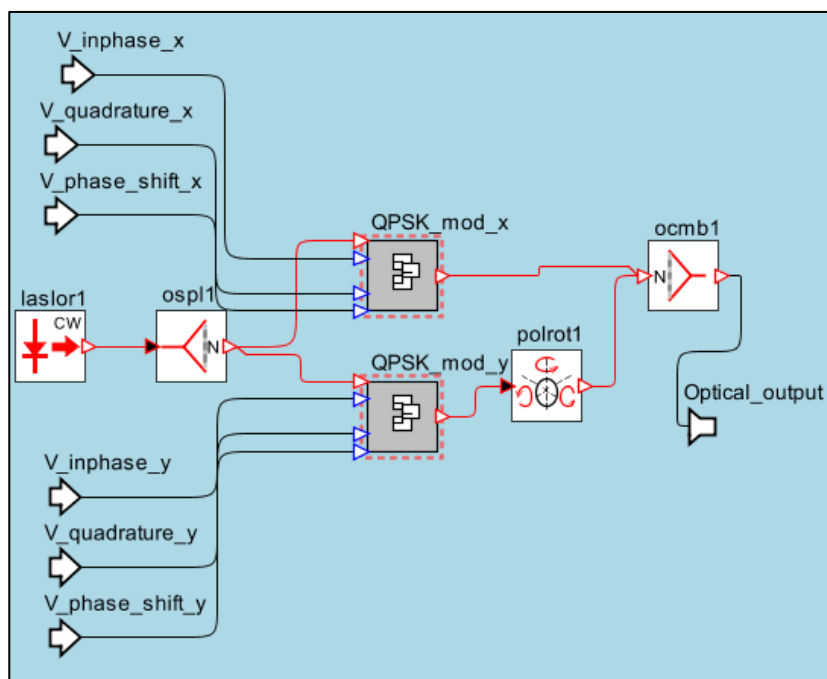
V poslední simulační části byl navržen systém za použití PM-QPSK (Polarization multiplexed-Quadrature phase-shift keying) modulace. Tato modulace se hojně využívá při návrhu 100Gb/s vysílačů. Schéma vysílače v prostředí OptSim je na následujícím obrázku.



Obrázek č. 25 – Schéma PM-QPSK vysílače

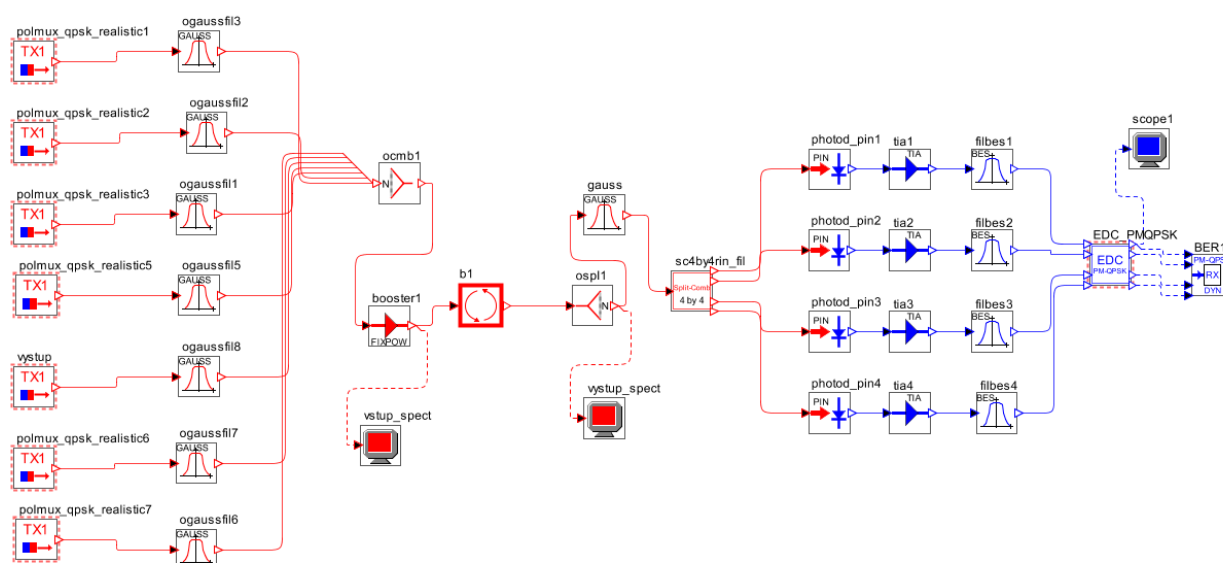
Vysílač se skládá ze čtyř datových generátorů o bitové rychlosti 28,5 Gb/s. Následují NRZ ovladače, Besselovy filtry a generátory elektrického signálu zajišťující posun fáze.

Signál je generován dvěma nezávislými QPSK modulátory, které jsou zastoupeny v bloku polmux\_qpsk1. Blok je zobrazen níže.



Obrázek č. 26 – Schéma bloku polmux\_qpsk1

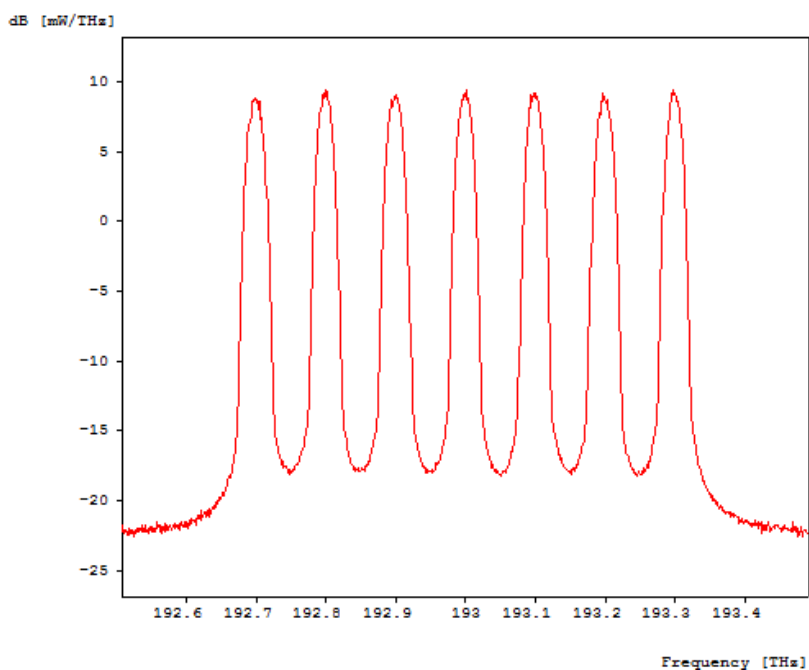
Výstupy modulátorů jsou vzájemně sloučeny do dvou ortogonálních polarizačních rovin. Vlivem toho je symbolová rychlost čtvrtinová oproti rychlosti bitové. Celý systém se skládá ze 7 kanálů o přenosové rychlosti přes 100 Gb/s a kanálová rozteč je 100 GHz. Celková přenosová rychlost systému je více než 700 Gb/s. Pro přenos bylo zvoleno 80 km dlouhé NZDSF vlákno o hodnotě disperze 4 ps/nm/km pro vlnovou délku 1500 nm. Disperze byla post-kompenzována pomocí FBG. Topologie je zobrazena na následujícím obrázku.



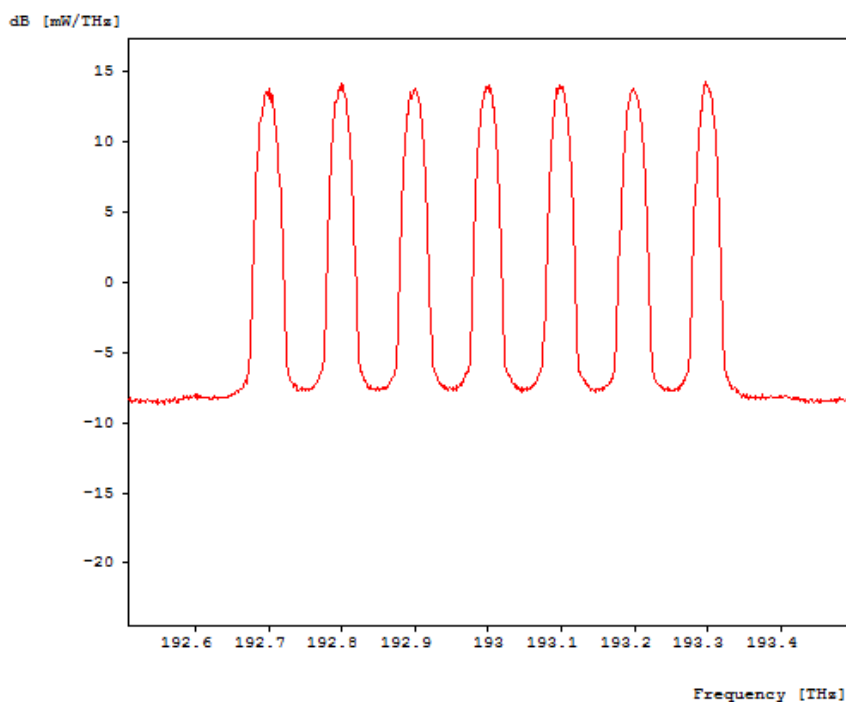
Obrázek č. 27 – Schéma topologie 700 Gb/s PM-QPSK systému

Vyhodnocení probíhá v bloku BER1. Kvůli výpočetní náročnosti je systémem vysláno  $10^6$  bitů. Celková nejlepší dosažitelná chybovost je tedy  $10^{-6}$ .

Pro první simulaci byla nastavena celková délka optického spoje na 1600 km. Hodnota úrovně výkonu boosteru byla nastavena na 1 dBm a u průběžných zesilovačů na 6 dBm. Toto nastavení vychází z předchozích simulací, které zde uvedeny nejsou. Ukázalo se, že PM-QPSK není schopná operovat na tak vysokých výkonových úrovních jako tomu bylo u RZ-DQPSK a amplitudové modulace. Spektrum signálu je zobrazeno níže.

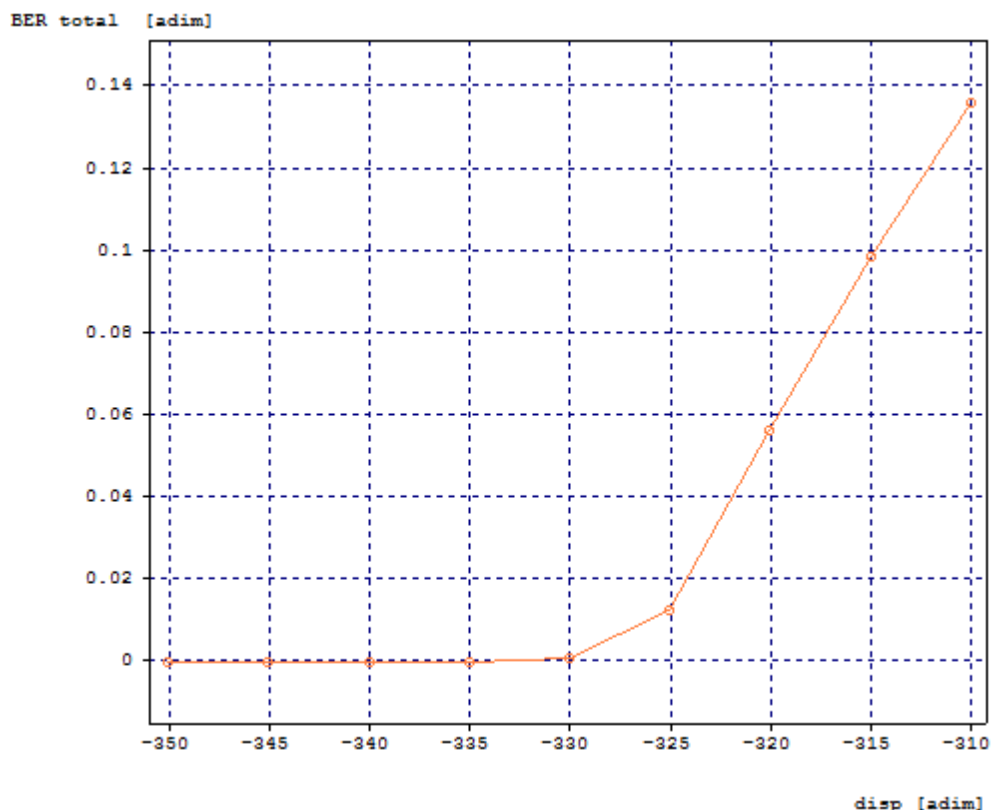


Obrázek č. 28 – Vstupní spektrum 700Gb/s PM-QPSK systému délky 1600 km



Obrázek č. 29 – Výstupní spektrum 700Gb/s PM-QPSK systému délky 1600 km

V simulaci byl testován vliv disperzní kompenzace na chybovost systému. Testované rozmezí hodnoty FBG modulu bylo od -350 ps/nm do -310 ps/nm. Průběh chybovosti systému na míře disperzní kompenzace je zobrazen na následujícím grafu.



Graf č. 17 – Závislost chybovosti přenosu na míře disperzní kompenzace pro 700Gb/s PM-QPSK systém délky 1600 km

Ze simulace vyplynul zajímavý výsledek. Pro hodnoty disperze v rozsahu -350 ps/nm až - 325 ps/nm dosahovala chybovost systému nejlepších výsledků řádově  $10^{-4}$ . Kompenzace disperze na hodnoty nižší než nula zlepšila celkovou chybovost systému. Naopak pro hodnoty vyšší dochází k neschopnosti informačního přenosu.

Byla provedena také simulace pro spoj délky 2400 km. Chybovost se zvýšila pouze o řád na hodnotu  $10^{-3}$ . To je velmi dobrý výsledek. Ze spekter na obrázku č.28 a č.29 lze pozorovat, že nedošlo ke změně tvaru spektra. Došlo ke snížení OSNR. To je způsobeno šumem zesilovačů. V dalších simulaci proto byla prodloužena délka regeneračního úseku vlákna z 80 km na 120 km. Vlivem toho poklesne celkový počet zesilovačů v optické trase o třetinu. Chybovost se zvýšila na hodnotu  $10^{-2}$ , i přesto se PM-QPSK modulace ukázala vhodnou pro vysokorychlostní přenos na dlouhé vzdálenosti.

## 5. Závěr

Výsledkem práce je několik úspěšných simulací mezikontinentálních optických spojů. V první řadě se jedná o 10Gb/s spoj o celkové délce 10 000 km. Vlivem značné kanálové rozteče WDM systému a nízkému datovému toku mohl být v optické trase použit vysoký výkon. Toto nastavení způsobilo vysoké OSNR po celé délce trasy. Přestože vlivem výkonu v kombinaci s kompenzací disperze na nulu byl způsoben vznik FWM, bylo docíleno velmi dobré celkové chybovosti systému. Došlo tedy k ověření robustnosti amplitudové modulace při nízké přenosové rychlosti na velmi dlouhé vzdálenosti.

V následujícím 160Gb/s DWDM systému založeném na amplitudové modulaci se podařilo po sérii dílčích simulací docílit chybovosti  $0,18 \cdot 10^{-16}$ . Zmíněná chybovost byla naměřena pro systém délky 1800 km. Nejdůležitějším zjištěním celé práce je fakt, že nejvýraznější degradaci signálu způsobuje šum průběžných zesilovačů. Hodnota šumového čísla zesilovače je fyzikálně omezena na 3 dB. Vlivem toho nemůže být lepším nastavením jednotlivých modulů docíleno výrazného zlepšení chybovosti celého systému.

V závěrečné části práce bylo sestaveno několik vysokokapacitních optických přenosových systémů. Kromě přenosové rychlosti se spoje lišily především použitím různých modulačních formátů. První představený 96kanálový DWDM spoj o celkové přenosové kapacitě 960 Gb/s se ukázal pro přenos na dlouhé vzdálenosti jako nevhodný. Vlivem velkého množství kanálů dochází k interferenci intermodulačních produktů FWM s užitečným signálem. Amplitudová modulace proto není vhodným řešením při vysokorychlostním optickém přenosu.

V dalším systému byla tedy testována modulace RZ-DQPSK, která se vyznačuje lepší odolností vůči šumu a chromatické disperzi. Pro ověření byl navrhnout 16kanálový systém o celkové kapacitě 640 Gb/s. Pro délku optického spoje 2400 km se podařilo dosáhnout chybovosti řádově  $10^{-10}$ . Jedná se o nejlepší dosaženou hodnotu v celé práci, která je opět nejvíce limitována šumem průběžných zesilovačů. Systém založený na RZ-DQPSK modulaci se ukázal pro mezikontinentální datový přenos jako vhodný.

V poslední simulaci 7kanálového 700Gb/s PM-QPSK systému došlo k zajímavému a významnému jevu. Disperzní kompenzace na hodnoty nižší než nula výrazně potlačuje celkovou chybovost systému.

Hlavním přínosem práce jsou zaznamenané možné přístupy při návrhu optických přenosových systémů na dlouhé vzdálenosti. Podařilo se docílit výsledků limitovaných pouze šumem optických zesilovačů, a proto lze považovat cíle práce za beze zbytku splněné.

## Zdroje

- [1] Boháč L., Lucki M. Optické komunikační systémy. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2010.
- [2] S. Ten et al.: Ultra-low loss, ultra-large Aeff optical fibers for undersea networks, OECC, Japan, 2016.
- [3] L. Garrett et al.: Design of global submarine networks, Journal of Optical Communications and Networking, Vol.10 ,No.2, 2018.
- [4] L. Mollenauer, "Best way to build the all-optical, ultra-long haul terrestrial network," 2001 Digest of LEOS Summer Topical Meetings: Advanced Semiconductor Lasers and Applications/Ultraviolet and Blue Lasers and Their Applications/Ultralong Haul DWDM Transmission and Networking/WDM Compo, Copper Mountain, CO, USA, 2001, pp. 2 pp.-, doi: 10.1109/LEOSST.2001.941935.
- [5] Huawei-Single-Mode Optical Fiber. Welcome to ngxin! [online]. Copyright © Huawei Technologies Co., Ltd. [cit. 11.08.2020]. Dostupné z: [https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/30\\_fiber.html](https://info.support.huawei.com/network/ptmngsys/Web/WDMkg/en/30_fiber.html)
- [6] RP Photonics Encyclopedia - dispersion-shifted fibers, optical fiber. RP Photonics - consulting on laser technology, nonlinear optics, fiber optics; simulation and design software [online]. Copyright © RP Photonics Consulting GmbH [cit. 11.08.2020]. Dostupné z: [https://www.rp-photonics.com/dispersion\\_shifted\\_fibers.html](https://www.rp-photonics.com/dispersion_shifted_fibers.html)
- [7] Effect of Four-Wave Mixing on the Transmission Performance of O-Band Multichannel PAM-Based Unamplified Datacenter Interconnects. 403 - Forbidden: Access is denied. [online]. Copyright © 2018 Scientific [cit. 11.08.2020]. Dostupné z: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ijnc.20180803.02.html>
- [8] Submarine Cable Map. Submarine Cable Map [online]. Dostupné z: <https://www.submarinecablemap.com/>
- [9] Song, Houbing. (2012). Model-Centric Approach to Discrete-Time Signal Processing for Dense Wavelength-Division Multiplexing Systems.
- [10] Google is laying a giant new undersea internet cable stretching from New York to the UK and Spain. Business Insider South Africa [online]. Copyright © 2020 Business Insider Inc. All rights reserved. Registration on or use of this site constitutes acceptance of our [cit. 11.08.2020]. Dostupné z: <https://www.businessinsider.co.za/google-undersea-cable-grace-hopper-2020-7>
- [11] Rekordy podmořských optických kabelů nekončí | Technický týdeník. TT | Technický týdeník [online]. Copyright © Business Media CZ Nádražní 32, 150 [cit. 11.08.2020]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/rekordy-podmorskych-opticky-kabelu-nekonci\\_43808.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/rekordy-podmorskych-opticky-kabelu-nekonci_43808.html)

- [12] R. Weidenfeld, M. Nazarathy, R. Noe and I. Shpantzer, "Volterra nonlinear compensation of 112 Gb/s ultra-long-haul coherent optical OFDM based on frequency-shaped decision feedback," 2009 35th European Conference on Optical Communication, Vienna, 2009, pp. 1-2.
- [13] K. Ogura, A. Nakamura and M. Itami, "A study on class a impulsive noise cancellation and channel estimation under Rayleigh fading environment," 2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), Las Vegas, NV, 2018, pp. 1-2, doi: 10.1109/ICCE.2018.8326212.
- [14] Parametry optických vláken. [online]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/06.html>
- [15] C. O. Saiki, O. A. Otesile and M. Toygan, "Transmission of ultra wide band signals over long haul distances using dispersion compensation," 2013 21st Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Haspolat, 2013, pp. 1-4, doi: 10.1109/SIU.2013.6531523.
- [16] Y. Kawaguchi and T. Tsuritani, "Ultra-long-haul multicore fiber transmission over 5,000 km using cladding pumped seven-core EDFA," 2017 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC) and Photonics Global Conference (PGC), Singapore, 2017, pp. 1-2, doi: 10.1109/OECC.2017.8114873.
- [17] K. Igarashi, T. Tsuritani, I. Morita and M. Suzuki, "Super-Nyquist-WDM techniques for ultra-long-haul high-capacity optical fiber transmission systems," 2015 Opto-Electronics and Communications Conference (OECC), Shanghai, 2015, pp. 1-3, doi: 10.1109/OECC.2015.7340061.
- [18] G .695: Optical interfaces for coarse wavelength division multiplexing applications [online]. 27.3 .2015 [cit. 2020-08-11]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.695/en>
- [19] Agalliu, Rajdi. Optimization of optical transmission systems [online]. Praha, 2017 [cit. 2020-08-12]. Doktorská práce. České vysoké učení technické v Praze, Elektrotechnická fakulta. Ing. Michal Lucki, Ph.D. Dostupné z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73642/Disertace\\_Rajdi%20Agalliu\\_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73642/Disertace_Rajdi%20Agalliu_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [20] RSoft Design Group OptSim Models Reference: Sample Mode
- [21] G .671: Transmission characteristics of optical components and subsystems [online]. 13. 2 .2012 [cit. 2020-08-12]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.671/en>
- [22] G .694: Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid [online]. 15. 6.2012 [cit. 2018-04-13]. Dostupné z: <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.694.1/en>
- [23] RSoft Design Group, Inc. OptSim User Guide. ©1989-2010.
- [24] R. Bikmetov, M. Y. A. Raja and K. Kazi, "400Gb/s in a single spectral channel of hybrid



- optical transmission system with 100 digital channels," 2014 11th Annual High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies (Photonics for Energy), Charlotte, NC, 2014, pp. 159-163, doi: 10.1109/HONET.2014.7029382.
- [25] Lucki, M., Zeman, T. Dispersion Compensating Fibres for Fibre Optic Telecommunication Systems. In: *Advances in Optical Fiber Technology: Fundamental Optical Phenomena and Applications*. Rijeka: InTech, 2015 [cit. 2020-08-12]
- [26] P. Harper, S. B. Alleston, W. Forysiak and N. J. Doran, "10 Gbit/s dispersion-managed soliton transmission over 13,400 km in a weak, symmetric non-zero dispersion shifted fiber dispersion map," *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2000)*. Technical Digest. Postconference Edition. TOPS Vol.39 (IEEE Cat. No.00CH37088), San Francisco, CA, USA, 2000, pp. 237-238, doi: 10.1109/CLEO.2000.906959.
- [27] Agrawal, G. P. *Applications of nonlinear fiber optics*. 2nd ed. Boston: Elsevier, c2008. ISBN 9780123743022.
- [28] Ferreira, Mário F. S. *Nonlinear effects in optical fibers*. Washington, D .C: Optical Society of America, c2011. ISBN 0470464666.
- [29] Kirstädter, A. *Photonische Netze: Beiträge der 16. ITG-Fachtagung, 7 -8 . Mai 2015, Hochschule für Telekommunikation Leipzig*. Berlin: VDE Verlag, 2015. ISBN 978-3 - 8007-3938-7.
- [30] IEEE Standard for Ethernet - Amendment 4: Physical Layers and Management Parameters for 50Gb/s, 200Gb/s, and 400Gb/s Operation over Single-Mode Fiber," in *IEEE Std 802.3cn-2019 (Amendment to IEEE Std 802.3-2018 as amended by IEEE Std 802.3cb-2018, IEEE Std 802.3bt-2018, and IEEE Std 802.3cd-2018)* , vol., no., pp.1-87, 20 Dec. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8937109.
- [31] M. Talha, H. U. Zaman and K. M. A. Salam, "A comparative study of different dispersion compensation techniques in long haul communication," *2015 International Conference on Computer and Information Engineering (ICCIE)*, Rajshahi, 2015, pp. 58-61, doi: 10.1109/CCIE.2015.7399318.
- [32] M. P. Nikodem, W. Zurawski and K. M. Abramski, "Four-Wave Mixing in Non-Zero Dispersion Shifted Fibers," *2008 10th Anniversary International Conference on Transparent Optical Networks*, Athens, 2008, pp. 342-345, doi: 10.1109/ICTON.2008.4598807.