



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

**Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem**  
Villamosmérnöki és Informatikai Kar  
Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan tanszék

Fekete Gábor

# **2R ALAPÚ OPTIKAI REGENERÁTOROK**

KONZULENS

Gerhátné Dr. Udvary Eszter

BUDAPEST, 2012

# Tartalomjegyzék

<b>Tartalomjegyzék .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Bevezető .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Nemlineáris jelenségek .....</b>	<b>5</b>
2.1 Nemlineáris fázis moduláció.....	5
2.1.1 Önfázis moduláció .....	6
2.1.2 Kereszfázis moduláció.....	6
2.2 Négyhullám keverés .....	6
2.3 Kereszterősítés moduláció .....	7
2.4 Kereszterősítés elnyomás.....	8
<b>3 Optikai jelregenerátorok.....</b>	<b>9</b>
3.1 Önfázis moduláció elvén működő regenerátor .....	9
3.2 Kereszfázis moduláció elvén működő regenerátor .....	10
3.3 Négyhullám keverés elvén működő regenerátor.....	11
3.4 Kereszterősítés moduláció elvén működő regenerátor .....	13
3.5 Optikai regenerátorok működési elveinek összehasonlítása.....	15
<b>4 XGM regenerátor .....</b>	<b>16</b>
4.1 Egylépcsős XGM regenerátor szimulációja .....	16
4.1.1 A szimulációs modell.....	16
4.1.2 Bemeneti jel-zaj viszony hatása a regenerálásra.....	19
4.1.3 Az invertált jel hullámhossza.....	21
4.2 Kétlépcsős XGM regenerátor szimulációja .....	23
4.2.1 A szimulációs modell.....	23
4.2.2 Szinkronizáció vizsgálata a Regenerator #2 bemenetén.....	25
4.2.3 Az XGM jelenség kialakulása .....	27
4.2.4 Jel-zaj viszony hatása a regenerálásra .....	34
4.2.5 Bemeneti szűrő nélküli regenerátor .....	40
<b>5 SPM regenerátor .....</b>	<b>44</b>
5.1 A szimulációs modell.....	44
5.2 Az SPM hatása a bemeneti jelre .....	44
5.3 Jel-zaj viszony hatása a regenerálásra.....	47
<b>6 Az XGM és SPM regenerátor összehasonlítása .....</b>	<b>49</b>

<b>Összefoglalás.....</b>	<b>52</b>
<b>Irodalomjegyzék.....</b>	<b>53</b>

# 1 Bevezető

Az internet egyre több eszközzel érhető el (pl. mobiltelefon, tablet), és az új internetes szolgáltatások jelentek meg (pl. videó megosztó portálok, internetes tévé, filmkölcsonzó), melyek jelentősen megnövelték az adatforgalmat a hálózatokban. Az internet globális jellege miatt, a felhasználók által kért adatokat gyakran a több ezer kilométer távolságra lévő adatforrásoktól kell eljuttatni a felhasználókhöz. Ez a távközlési gerinchálózatokban nagytávolságú és nagy sebességű összeköttetéseket igényel, éppen ezért a gerinchálózatok ma már mind optikai alapú hálózatok. Az üvegszál kis csillapítása 0,2 dB/km lehetővé teszi a nagy távolságú összeköttetéseket. Erősítők elhelyezésével az adó és vevő közti távolság tovább növelhető, de nem akármeddig. Az erősítők a jelhez zajt adnak, valamint az üvegszálban fellépnek a diszperzióból eredő jeltorzulások is, melyeket kompenzálni kell. A torzult jelet helyreállítani legegyszerűbben a hálózatban elhelyezett regenerátorokkal lehet. Előnyös lenne, ha a regenerátor tisztán optikai módon működne, hogy megőrizzük az optikai hálózat átlátszóságát. Így a nagyobb sebességre történő áttéréskor csak az adó és vevő oldalt kellene lecserélni, a közbenső hálózat pedig érintetlenül maradhatna. Tisztán optikai regenerátor egyelőre csak 1R (reamplify) és 2R (reamplify and reshape) megvalósításban létezik. Az 1R megoldás nem más mint egy erősítő, míg 2R esetben már jelformálás is történik. Az időzítést visszaállító tisztán optikai 3R (reamplify, reshape and retime) regenerátor még nem létezik, komoly kutatások folynak ezen irányba jelenleg. A TDK dolgozatomban bemutatom a tisztán optikai 2R regenerátor megvalósítási lehetőségeket és a jelalakformáláshoz használt nemlineáris jelenségeket. Két regenerátor típust vizsgállok meg a keresztterősítés és az önfázis moduláció elvén működőt. A regenerátorok vizsgálatait a VPItransmissionMaker programban végeztem el.

## 2 Nemlineáris jelenségek

Az optikai regenerátorokban a jelalakformálást az optikai eszközökben fellépő nemlineáris jelenségek egyikével végezzük el. Ezen folyamatok igen jól ismertek, ami előnyössé teszi használatukat a regenerátorokban. A jelalakformálás során csak azt kell biztosítani, hogy a nemlineáris jelenségek megfelelő mértékben alakuljanak ki a regenerátorban. A nemlinearitás nagysága az eszközre érkező fényintenzitás nagyságával arányos. Nagyobb fényteljesítményeknél, nagyobb nemlineáris torzítás fog bekövetkezni. A nemlineáris jelenségek kialakulásához akár néhány W-os jelszint is szükséges lehet, szemben egy egyszerű lézer  $n \cdot 10\text{mW}$ -jával. A nemlineáris jelenségek használatának hátránya, hogy az így létrehozott kimeneti jelek jelszintje kisebb lesz, mint a bemeneti jelé, hiszen torzítási jelenségeket használunk ki jelalakformálásra, melyek intenzitásban mindig elmaradnak a bemeneti jelhez képest. A következőkben azt a négy nemlinearitást mutatom be, amelyeket a tisztán optikai regenerátorokban alkalmaznak.

### 2.1 Nemlineáris fázis moduláció

A fázis modulációt az optikai Kerr-effektus okozza. Az üvegszálaban terjedő nagy intenzitású fény ( $n \cdot 10\text{mW}$ ) eltérő törésmutató értékeket érzékel a szálaban való terjedés során, ami egy fázis modulációt fog okozni az áthaladó fényen. A fényintenzitás nagyságának hatására bekövetkező törésmutató változás mértékét ( $\Delta n$ ) az alábbi módon lehet meghatározni:

$$\Delta n = n_2 \cdot I \quad (2.1)$$

A fenti egyenletben szereplő  $n_2$  az üvegszál nemlineáris törésmutatója,  $I$  pedig a fény intenzitása. A fény intenzitása változik az időben, hiszen adatátvitel esetén a lézer fényét amplitúdóban moduláljuk. Az intenzitás változása az időben, a törésmutató értékében egy időfüggő változást fog okozni. A törésmutató változása eltérő jelterjedési sebességet eredményez az üvegszálaban, ami eltérő terjedési időket okoz. Az üvegszál mentén a jel más-más fázissal fog rendelkezni. Az üvegszálaban áthaladó jelen kialakul egy fázis moduláció. Az üvegszál végén a jelen nem csak az eredeti intenzitás moduláció lesz jelen, hanem a nemlinearitásból adódóan egy fázis moduláció is. A jelen megjelenő fázis moduláció a jel spektrumát kiszélesíti, így a diszperzióból származó

jeltorzulás is nagyobb lesz. A jel fázisának megváltozása ( $\Delta\varphi$ ) a következő módon számolható [2]:

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi \cdot n_2 \cdot L}{\lambda_i} \left[ I_i(t) + 2 \sum_{i \neq j} I_j(t) \right] \quad (2.2)$$

A fenti egyenletben  $L$  az üvegszál hossza,  $\lambda$  a fény hullámhossza,  $i$  pedig a csatorna index. Az összefüggésből adódik, hogy a nemlineáris fázis moduláció két részből tevődik össze egy önfázis- és egy keresztfázis modulációból.

### 2.1.1 Önfázis moduláció

Önfázis modulációról (SPM – Self-phase Modulation) beszélünk, ha a jelen megjelenő fázis modulációt, a jel saját intenzitás modulációja hozza létre. Ekkor a (2.2) összefüggés zárójelben lévő második tagja nulla értékű, azaz az üvegszálon csak egyetlen jel halad keresztül. Az SPM a jel időbeli alakját nem változtatja meg, csak a spektrumát szélesíti ki. A spektrum kiszélesedése kiszámolható, ha vesszük a (2.2) egyenlet idő szerinti deriváltját:

$$\Delta\omega_{\text{SPM}} = \frac{2\pi \cdot n_2 \cdot L}{\lambda} \frac{dI(t)}{dt} = \frac{2\pi \cdot n_2 \cdot L}{\lambda \cdot A_{\text{eff}}} \frac{dP(t)}{dt} \quad (2.3)$$

A fenti összefüggésből egyértelműen látszik, hogy nagyobb jelintenzitás nagyobb spektrális kiszélesedést fog okozni.

### 2.1.2 Keresztfázis moduláció

Keresztfázis modulációnál (XPM – Cross-phase Modulation) az üvegszálon haladó  $i$ . jel a fázisváltozását egy másik ( $j$ .) csatorna jele okozza. A  $j$ . csatorna intenzitás változása által létrehozott törésmutató változást, a szomszédos ( $i$ .) csatornán haladó jel is érzékelti fogja, ezáltal az  $i$ . csatornára is rá fog kerülni egy fázis moduláció. Az előbb elmondottakból adódik, hogy XPM jelenségről csak többcsatornás rendszer esetén beszélhetünk. Az általa okozott fázisváltozást a (2.2) összefüggés zárójeles részében lévő második tag írja le. Az XPM szintén a jel spektrumának a kiszélesedését fogja okozni.

## 2.2 Négyhullám keverés

Négyhullám keverésről (FWM – Four Wave Mixing) kizárólag többcsatornás rendszereknél lehet beszélni. Az FWM egy harmadrendű nemlineáris jelenség, ami

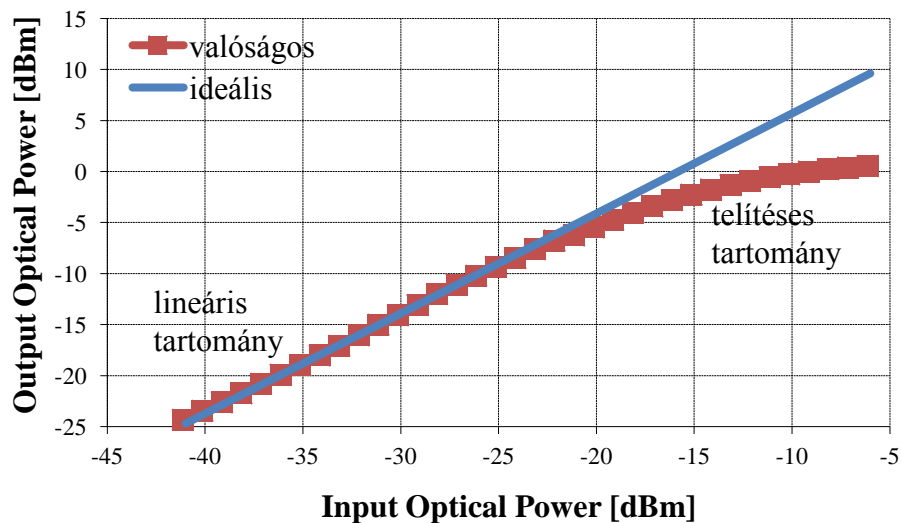
szintén az optikai Kerr-effektuson alapszik. Az átvitel során a csatornák között áthallás jön létre, a különböző csatornák jelei keverednek egymással. A keveredésből adódó új jel lehetséges hullámhossza az alábbi módon határozható meg:

$$\lambda_4 = \lambda_1 \pm \lambda_2 \pm \lambda_3 \quad (2.4)$$

A csatornák közti keveredés csak közeli hullámhosszokon jön létre. A kikeveredett termék nagysága függ a keveredett csatornák távolságától és a csatornák intenzitásától. A négyhullám keverésből származó termékek közül azok a legkárosabbak, melyek pont egy átviteli csatornára esnek.

## 2.3 Kereszterősítés moduláció

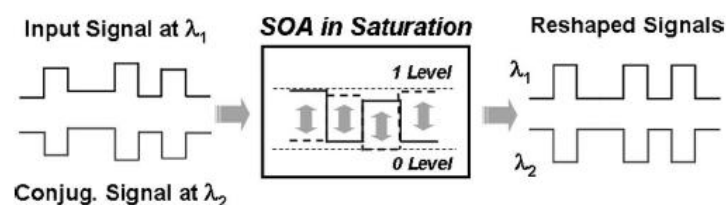
A kereszterősítés moduláció (XGM – Cross Gain Modulation) a félvezető optikai erősítőkben (SOA – Semiconductor Optical Amplifier) alakul ki. A SOA erősítése függ a bemenetére érkező jel nagyságától. Kis intenzitású jeleket nagyobb mértékben képes erősíteni, mint nagyszintű jeleket, melyek szintje közel esik az erősítő maximális kimeneti jelteljesítményéhez. Egy SOA  $P_{ki}$ - $P_{be}$  görbéje látható a 2.1. ábrán. Az erősítő lineárisan működik egészen -30dBm-es bemenő jelszintig. Ennél nagyobb bejövő jelszintek esetén, csökken a SOA erősítése, telítésbe kerül az eszköz. Ez egy nemlineáris jelenség, ami a SOA-ra kerülő jelen egy erősítés modulációt fog okozni nagy jelszintek esetén. A moduláció következtében csökken a logikai „0” és „1” szintek közötti távolság, akár el is tűnhet. Kereszterősítés modulációnál ezt a jelenséget a jelen egy szintén a SOA-ra adott másik jellel hozzuk létre. A másik jellel telítésbe vitt erősítő erősítése az eredeti jelen ily módon befolyásolható.



2.1. ábra. SOA nemlineáris erősítés görbéje.

## 2.4 Kereszterősítés elnyomás

A kereszterősítés elnyomás (XGC – Cross Gain Compression) szintén SOA-ban jön létre, és hatását tekintve nagyon hasonló az XGM-hez. Az XGC során is egy erősítés moduláció jön létre a SOA-ban, azonban az erősítőt telítésbe vivő jel és a hasznos adatjel nem független egymástól. A SOA bemenetén lévő két jel egymás logikai inverze. Az XGC jelenség a 2.2. ábrán figyelhető meg. A megfelelő kereszterősítés elnyomás kialakulásához a SOA-nak erősen telített állapotban, a két jelnek a bemenetén pedig szinkronban kell lennie. Az erősítőben a logikai „0” és „1” állapotok egyforma sebességgel haladnak. A SOA bemenetén lévő két jel egymás negáltja, így az erősítőben egyszerre mindig csak az egyik jelen lesz logikai „1” állapot. A telítés miatt a logikai „1” szintje közel azonos lesz a SOA maximális kimeneti jelszintjével. Azonban a logikai „1”-gyel együtt haladó logikai „0”-át már nem képes a SOA erősíteni a telítés miatt, mivel már nincsenek szabad töltéshordozók, amik indukált emisszió hatására fényt bocsájthatnának ki a „0”-át tartalmazó jel hullámhosszán. A logikai „0” jelszintje csökkenni fog a kimeneten a bemenethez képest. A telített SOA amplitúdó kiegyenlítőként viselkedik a logikailag magas szinteken, míg a logikailag alacsony jelek szintjét csökkenti. Ezen felül a telítésben működő SOA-nak van egy felül áteresztő szűrőhöz hasonló hatása a két logikai szimbólumra, ahol a szűrő levágási frekvenciája körülbelül 1GHz.



2.2. ábra. Kereszterősítés elnyomás egy telített SOA-ban. [10]

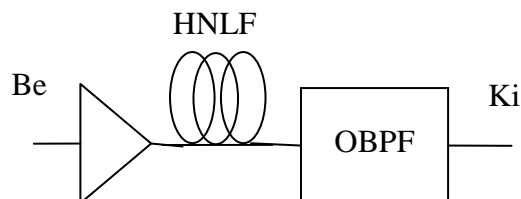


## 3 Optikai jelregenerátorok

Ebben a fejezetben az előbb bemutatott nemlineáris jelenségekre épülő tisztán optikai 2R regenerátor megvalósításokat mutatom be a [4]-[12] irodalmak alapján.

### 3.1 Önfázis moduláció elvén működő regenerátor

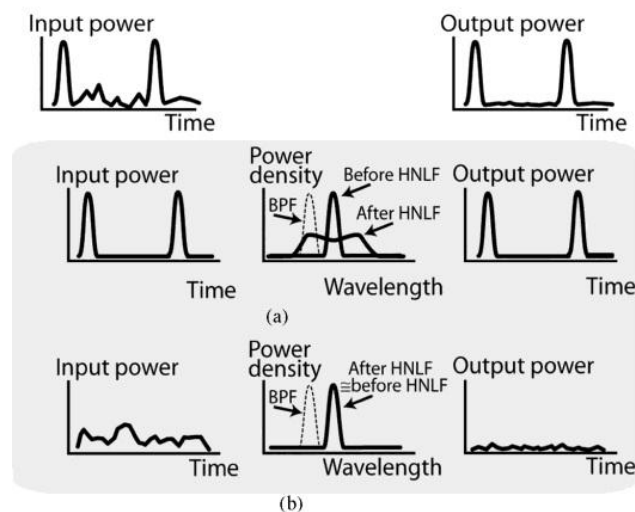
Ezen regenerátorokban a jelalakformálás a nemlineáris önfázis modulációval történik. A bemutatásra kerülő regenerátorok közül ennek a legegyszerűbb a felépítése, ami nagyban elősegítheti elterjedését. A megvalósításához mindössze három elem szükséges, egy erősítő, egy nemlineáris üvegszál és egy sáváteresztő szűrő. A regenerátorban alkalmazott erősítő lehet egy általánosan használt EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier) is, aminek a feladata, hogy a bemenetre érkező jelet felerősítse az SPM kialakulásához. Az erősítővel létrehozott nagy teljesítményszintű jel egy erősen nemlineáris (HNLF – High Non-Linear Fiber) üvegszálon halad keresztül, ahol a jel spektruma kiszélesedik az önfázis moduláció következtében. A HNLF szál helyett lehetne hagyományos üvegszálat is használni, de ekkor sokkal hosszabb üvegszállra lenne szükség a regenerátorban, hogy a jel spektruma megfelelő mértékben kiszélesedjen.



3.1. ábra. Egy SPM regenerátor felépítése.

A regenerátor kimenetén egy sáváteresztő szűrőt (OBPF – Optical Band Pass Filter) kell elhelyezni. A szűrő szerepét a jelalakformálás elvét bemutató 3.2. ábra segítségével lehet megérteni. Az ábra szürke keret nélküli része mutatja a regenerátor bemenetére érkező zajos jelsorozatot, és a kimeneten megjelenő zaj nélküli jelet. A szürkével kiemelt részben a regenerálás elve látható. A bemenetre érkező jel két komponensre bontható, az adó által kiadott jelsorozat (a rész) és az átvitel során a jelhez hozzáadódott zaj (b rész). A jel és a zaj spektrum képe a HNLF szál előtt megegyezik. A két spektrum között annyi a különbség, hogy a jel összetevői között a fázis koherens, míg a zaj esetében véletlenszerű az egyes összetevők fázisa. Az erősítést követően a jel

intenzitása jóval nagyobb lesz, mint a zajé. A HNLF szálon való áthaladáskor az SPM hatás következtében a jel spektruma kiszélesedik, viszont a zaj intenzitása túl kicsi az SPM jelenség kialakulásához, így a zaj spektruma nem változik meg az üvegszálon való áthaladás során. Az üvegszál után elhelyezett szűrővel a kiszélesedett spektrum egy keskeny részét átengedjük, míg a többi kiszűrésre kerül. A szűrő középhullámhosszát úgy kell megválasztani, hogy a szűrő által átengedett jelspektrumba ne essen bele semmilyen összetevő a zaj spektrumából. Az ábra a szűrő (BPF) spektrumát szaggatott vonallal mutatja a jel és a zaj spektrumában. A szűrő előbbi módon való elhelyezésével a kimeneti jel zajszintje jelentős mértékben csökkenthető. A regenerátor működéséhez elengedhetetlen a megfelelő mértékű jelkiszélesedés, ellenkező esetben a szűrő áteresztő sávjába nem fog beleesni a jel spektrumának egy része, így a kimeneten nem lesz jel. A módszer hátránya, hogy a kimeneti jel hullámhossza nem azonos a bemeneti jel hullámhosszával. Ez DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) rendszerekben megengedhetetlen, ahol 0,2nm hullámhosszal távolabb már egy másik csatorna jele található.

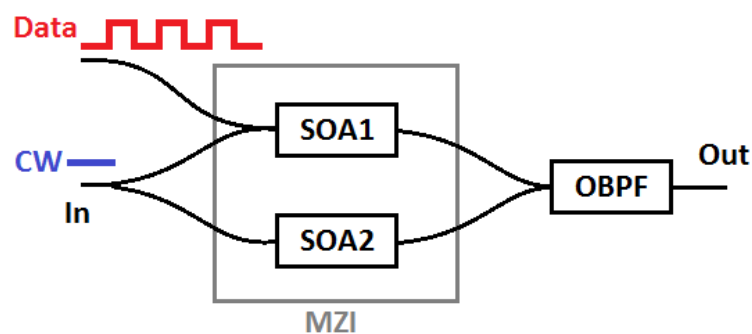


3.2. ábra. SPM regenerátor működési elve. [5]

### 3.2 Keresztfázis moduláció elvén működő regenerátor

A keresztfázis moduláció elvén működő 2R regenerátor Mach-Zender interferométeres (MZI) megvalósítását a 3.3. ábra mutatja. Az MZI a bemenetén lévő jelet egyenlő részben osztja szét a két ág között. Ha a két ág között létre tudunk hozni 180°-os fázis eltérést, akkor a kimeneten az újraegyesítésnél, a két jel eltérő fázisban fog találkozni és kioltás lesz. Ha a két jel fázis helyesen találkozik az újraegyesítésnél, akkor konstruktív interferencia alakul ki, a két jel összeadódik, és kimeneten

visszakapjuk az eredeti jelszintet (ideális esetben). Az MZI ezen tulajdonságát használjuk fel jelformálásra a regenerátorban. Az interferométer két ága között a fáziseltérést az ágakban elhelyezett SOA-kal hozzuk létre. Az interferométer mindkét ágába becsatolásra kerül egy folytonos lézer (CW – Continuous Wave) jele. Az információt hordozó Data jel viszont csak az interferométer felső ágába kerül becsatolásra. Az MZI kimenetén a CW jel fázis helyesen találkozik, ha a felső ágban elhelyezkedő SOA-ban nem jön létre keresztfázis moduláció. Ez pedig logikai „0” érkezéskor nem történik meg. Ha a Data jel logikai „1” értékű, akkor a két jel között létrejön az XPM hatás a SOA-ban, és megfelelő beállítások mellett a SOA pontosan  $180^\circ$ -os fázistolást hoz létre a CW jelen, ami a kimeneten destruktív interferenciát fog okozni. Ekkor a kimeneten a Data jel logikailag invertált jelét kapjuk meg, egy másik hullámhosszon. Az MZI után szükség van még egy szűrő elhelyezésére, amivel kiszűrjük a Data jelet. XPM esetén az MZI ágak CW jelei ellenfázisban is találkozhatnak, így kioltás jön létre. A Data jel hatására jön létre  $180^\circ$ -os fázistolás és lesz konstruktív interferencia a kimeneten, így a kimeneti jel nem lesz a bemeneti negáltja. A megvalósult hullámhossz konverzió többszörös rendszerben nem megengedhető, ezért ezen regenerátor esetén szükséges még egy ugyanilyen fokozat elhelyezése közvetlenül a kimeneti szűrő után. A második fokozattal a jel hullámhosszát visszaállítjuk az eredeti értékére.

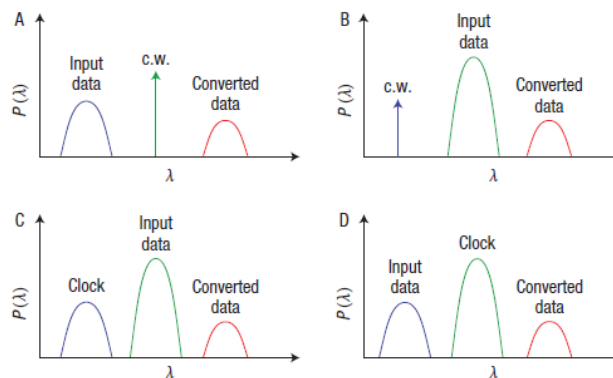


3.3. ábra. Mach-Zehnder interferométeres XPM regenerátor megvalósítás.

### 3.3 Négyhullám keverés elvén működő regenerátor

Négy lehetséges működési elv alapján készíthető regenerátor, ami az FWM jelenséget használja fel jelalakformáláshoz. A lehetséges elveket a 3.4. ábra mutatja. Az „A” és „B” esetben a keveréshez egy folytonos (CW) jelet használunk, míg a másik két esetben egy órajelet, ami szinkronizálva van bejövő jelhez. Az „A” esetben egy hagyományos hullámhossz konverzió történik a jel és a pumpáló CW között. A kettő

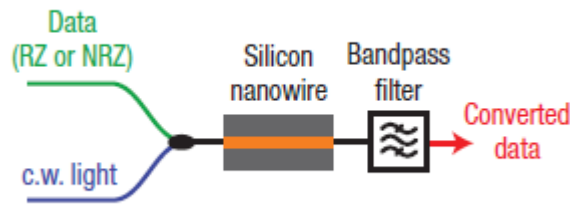
keveredéséből létrejött új jel intenzitása és a bemeneti jel intenzitása között lineáris kapcsolat van. Ez az elrendezés nem javít a jelalakon, ez nem használható fel jelregenerálásra. A „B” esetben a felerősített bejövő jel szolgál pumpáló forrásként. Ekkor létrejön jelformálás és javul a kioltási tényező (ER – Extinction Ratio). Ebben az esetben a bemeneti és a konvertált jel intenzitása között négyzetes kapcsolat van. A „C” és „D” eset már egy 3R regenerátort valósít meg, mivel az FWM jelenség a bemenő jel és egy ezzel szinkronizált órajel között jön létre. A keveredéssel kapott jel, így újraidőzítésre kerül és a jitter tartalma is csökken. A „C” esetben megint a bejövő jelet használjuk pumpáló forrásként, mint a „B” esetben. A kikeveredett új jel és a bemeneti jel intenzitása között szintén négyzetes az összefüggés, így létrejön jelalakformálás, és az új jel jobb ER-rel fog rendelkezni, mint a bemeneti jel. A „D” eset az „A”-hoz hasonló, itt szintén lineáris a kapcsolat a bejövő jel és az FWM-ből származó jel intenzitása között, így nem fog javulni az ER. Azonban pumpáló forrásként egy órajelet használunk, aminek következtében létrejön jelalakformálás és a kikeveredett jel jitter tartalma nagyobb mértékben csökken, mint a „C” esetben.



**3.4. ábra. Jel regenerálási elvek FWM jelenség felhasználásával. [8]**

Mivel a TDK munkámban csak a 2R regenerátorokkal foglalkozok, így itt csak a „B” esethez tartozó megvalósítást mutatok be a 3.5. ábrán. A regenerátor bemenetére érkező jelet egy CW jellel együtt becsatoljuk a nemlineáris elembe, ahol kialakul az FWM. A nemlineáris elem itt egy szilícium chipen létrehozott hullámvezető. A chipben létrejön a nemlineáris FWM jelenség, ami létrehozza a konvertált jelet. Ez a hullámhossz konvertált jel a regenerált jel. A regenerátor kimenetén csak erre a jelre van szükség ezért a Si chip után elhelyeznek egy sávszűrőt, ami csak a konvertált jelet engedi át. Az XPM elvű regenerátorhoz hasonlóan ez is megváltoztatja a bemeneti jel

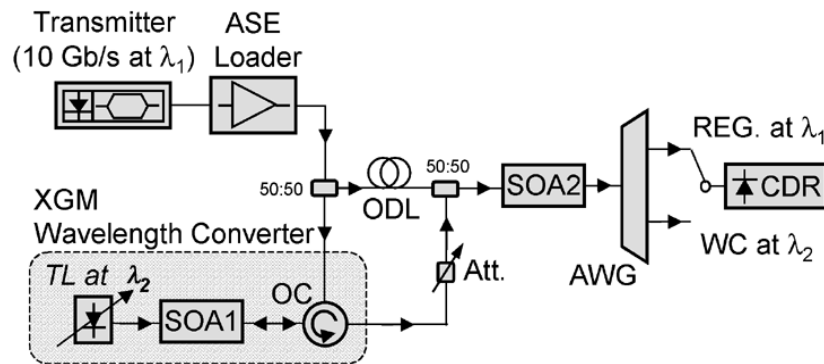
hullámhosszát, ami miatt DWDM rendszerekben korlátozottan alkalmazható, ha nem keverjük vissza a regenerált jelet az eredeti hullámhosszára.



3.5. ábra. Egy FWM alapú 2R optikai regenerátor. [8]

### 3.4 Kereszterősítés moduláció elvén működő regenerátor

A kereszterősítés moduláció elvén működő regenerátorban valójában két nemlineáris jelenséget is kihasználunk, hogy elkerüljük a hullámhossz konverziót a regenerátor kimenetén. A két felhasznált nemlineáris jelenség a kereszterősítés moduláció (XGM) és a kereszterősítés elnyomás (XGC). A regenerátor blokk vázlatát a 3.6. ábrán látható. Az ábra bal felső sarkában helyezkedik el a  $\lambda_1$  hullámhosszú adó. A lézer CW jelét egy külső modulátorral moduláljuk meg OOK (On-Off Keying) módon.



3.6. ábra. XGM elven működő regenerátor blokk vázlatát. [10]

A nagytávolságú összeköttetésekben keletkező jelalak romlást a jelhez történő zaj (ASE – Amplified Spontaneous Emission) hozzáadásával lehet modellezni. Az ASE Loader blokkot követő osztó bemeneti pontja egyben a regenerátor bemenete is. Az osztó a regenerátorba érkező jelet két egyenlő arányban osztja szét. Az osztó lefele irányú ágában a nemlineáris XGM jelenséget felhasználva történik jelalakformálás. A regenerátor bemeneti jele egy ciklátoron keresztül áthaladva a telített SOA1 erősítőbe jut. A SOA1 telített állapotát a  $\lambda_2$  hullámhosszú folytonos lézer okozza. Az ábrán ez egy hangolható lézer, de egy fix hullámhosszú lézer is elhelyezhető. Az XGM jelenség a

CW jelen egy modulációt hoz létre a bemeneti jel információjának függvényében. Ennek eredményeképpen a  $\lambda_2$  hullámhosszú CW jelen is megjelenik a bemeneti jel által hordozott információ, csak éppen negált logikai értékekkel. Az XGM a jelalakformálás mellett, a bemeneti jelen egy hullámhossz konverziót és egy logikai negálást is végez. Ezek közül egyik jelenség sem kívánatos, ezért még egy SOA-t tartalmazó fokozatot helyeznek el a regenerátorokban, a fenti jelenségek kiküszöbölésére. A visszafelé haladó hullámhossz konvertált jelet a cirkulátorral választjuk el az ellenkező irányba haladó bementi jeltől. A konvertált  $\lambda_2$  hullámhosszú jel még egy csillapítón (Att.) halad keresztül mielőtt hozzacsatoljuk a késleltetett bemeneti jelhez. A csillapító azért szükséges, hogy a bemeneti és a konvertált jel teljesítmény szintje közel azonos legyen. A regenerátor bementén lévő osztó másik portján lévő jelet az ODL (Optical Delay Line) segítségével késleltetjük, pontosan annyival, hogy szinkronba kerüljön a hullámhossz konvertált jellel. A késleltetőre és a csillapítóra azért van szükség, mert a regenerátor második fokozatában az XGC jelenséget használjuk ki az eddigi XGM helyett, mivel az XGC-hez minden jel rendelkezésre áll. A SOA2-ben a 2.4. fejezetben ismertetett módon kialakul a nemlineáris XGC, ami  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$  jelen további jelalakformálást végez, a jelszinteket egyenletessé teszi az impulzusokon. A SOA2 kimenetén a két jelet el kell választani egymástól, és csak azt szabad a regenerátor kimenetére kiengedni, amit a továbbiakban használni akarunk. Ha a regenerátor kimentén csak a regenerált bemeneti jelre van szükség, akkor a szétválasztáshoz elég egy szűrő is, ami  $\lambda_1$  hullámhosszon átenged, a többi hullámhosszon pedig nem. Ellenben ha szükségünk van a  $\lambda_2$  hullámhosszú jelre is, akkor célszerűbb egy hullámhossz függő osztót alkalmazni például egy AWG-t (Array Waveguide Grating), ahogy az a 3.6. ábrán is történt. A regenerátor egy másik lehetséges megvalósítása, mikor a második fokozatban is az XGM jelenséget használjuk fel. Ekkor nincs szükség a csillapítóra, a késleltető vonalra és az osztókra, ellenben a második fokozatban is el kell helyezni egy CW lézert, aminek a hullámhossza megegyezik a bejövő jel hullámhosszával. A regenerátor működési sebességét leginkább a SOA korlátozza ezért, 40Gbps átviteli sebességeknél már speciálisan kialakított SOA-kat alkalmaznak. Az XGM során a hullámhossz konverzió általában lefelé történik, mert ekkor jobb konverzió érhető el, mint fölfelé esetben. A fölfelé történő konverzió hatását rontja a maradék töltéshordozók okozta differenciális erősítés változása.

### 3.5 Optikai regenerátorok működési elveinek összehasonlítása

A 3.1.-3.4. fejezetekben bemutatott 2R regenerátorok előnyeit és hátrányait a 3.1. táblázatban foglaltam össze, mely a különböző módszerek összehasonlítását is lehetővé teszi. A bemutatott regenerátorok közül az SPM és az XGM módon történő jelalakformálás összehasonlítását végeztem el (6. fejezet). Előtte azonban külön-külön ismertetésre kerül a két regenerátor szimulációs eredményei.

<b>Típus</b>	<b>Előny</b>	<b>Hátrány</b>
<b>SPM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mindösszesen három „alap” elemből áll</li> <li>• nincs lézer a regenerátorban</li> <li>• Szilícium chipen megvalósítható</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hullámhossz eltolódás</li> <li>• viszonylag nagy (néhány wattos) jel teljesítmény szükséges a spektrum kiszélesedéséhez</li> </ul>
<b>XPM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• regeneráláshoz elég a jel fázisát megváltoztatni</li> <li>• SOA használata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• MZI két ága között a fáziseltolást pontosan kell létrehozni</li> <li>• hullámhossz konverzió</li> <li>• pumpáló lézer szükséges</li> </ul>
<b>FWM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ER javulás</li> <li>• jitter csökkenthető</li> <li>• Szilícium chipen megvalósítható</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• hullámhossz konverzió</li> <li>• pumpáló lézer szükséges</li> <li>• regenerált jel szintje kisebb, mint a beérkező jelé</li> <li>• keskeny szűrő a jelek szétválasztásához</li> </ul>
<b>XGM</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• viszonylag egyszerű</li> <li>• SOA használata</li> <li>• megvalósítható hullámhossz konverzió nélkül is</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• egy fokozat esetén a bemeneti jel negáltja van a kimeneten</li> <li>• hullámhossz konverzió</li> <li>• szükség van a jel inverzére a hullámhossz konverzió nélküli regeneráláshoz</li> <li>• pumpáló lézer kell a regenerátorban</li> </ul>

3.1. táblázat. Különböző 2R regenerátor megvalósítási elvek előnyei és hátrányai.

## 4 XGM regenerátor

Két lehetséges XGM regenerátor elrendezést vizsgáltam, az egy- illetve kétlépcsős megvalósítást. A kétlépcsős összeállítást a 3.6. ábrán már bemutattam. Ennek egylépcsős változata, amikor a második SOA elhagyásra kerül például a költségek csökkentése miatt. Az egylépcsős elrendezés hátránya, hogy nem csak a jel hullámhossza változik meg, hanem a kimeneten a bemeneti jel logikailag invertáltja jelenik meg. Az egyetlen SOA-t tartalmazó XGM regenerátornál a jelalakformálás minősége is csökkenni fog, hiszen nincsen második fokozat, ami a „0” és „1” jelszinteket közel egyforma nagyságúvá tenné.

### 4.1 Egylépcsős XGM regenerátor szimulációja

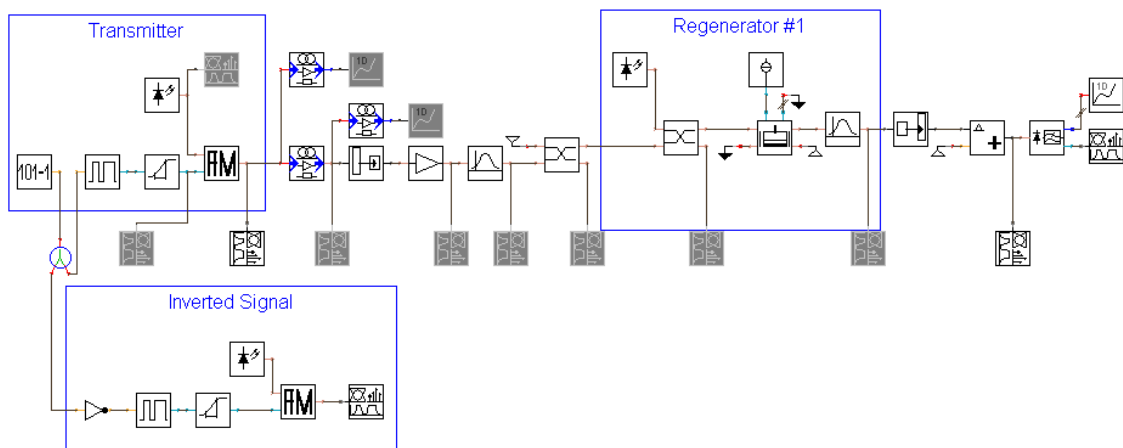
#### 4.1.1 A szimulációs modell

Az egylépcsős elrendezés modellje a 4.1. ábrán látható. A modell kialakításánál figyelembe vettem a kétlépcsős XGM regenerátor elrendezését is, hogy a két modell a lehető legkevesebb ponton térjen el egymástól, így az összehasonlításuknál ne kelljen különböző megszorításokkal élni. A későbbiekben bemutatásra kerülő kétlépcsős regenerátornál majd látni lehet, hogy a fenti célt sikerült megvalósítani, a két elrendezés egymástól csak a regenerátor egységek számában fog eltérni.

A regenerátor bemeneti jelét a bal felső sarokban kézzel bekeretezett Transmitter egység hozza létre. A regenerálandó bitsorozatot egy álvéletlen jelet előállító PRBS (Pseudo-Random Binary Sequence) jelgenerátor állítja elő. A bitsorozat sebességét 40Gbps-ra választottam, mert ez a maximális adatsebesség, ahol szükség lehet az intenzitásmodulált optikai jelek regenerálására. Nagyobb sebességeknél összetettebb modulációs módokat, illetve koherens átviteli rendszert használnak, amely más megközelítést igényel a jel regenerálása szempontjából is. A nagyobb adatátviteli sebességű jel jóval érzékenyebb a torzítási hatásokra (pl. a polarizációs módusdiszperzióra), ezért regenerálás nélkül csökken az áthidalható távolság. A létrehozott biteteket a következő blokk NRZ kódolással látja el, ami ideális jelalakot állít elő. A kódoló utáni blokk a valósághoz közelebbi jelalakot hoz létre úgy, hogy a fel- és lefutó éleknek véges meredekséget állít be. A 0-1 (1-0) jelváltás ideje a bitidő tized része. A jelváltás ideje alatt azt az időt kell érteni, mialatt az „1”-hez (0-hoz)

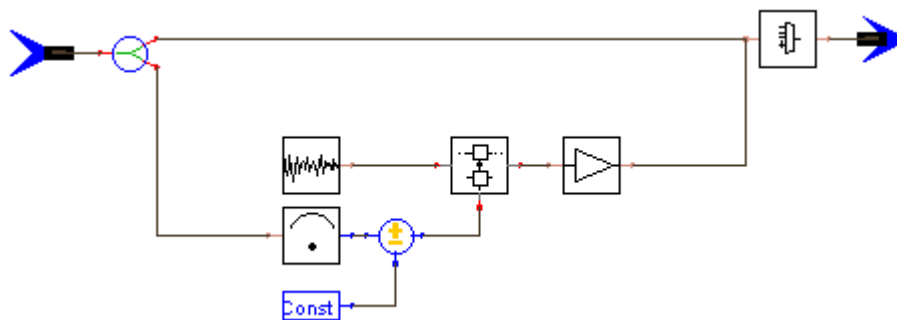


tartozó jelszint 10%-áról (90%-ról), a jel szintje eléri a logikai magas jelszint 90%-át (10%-át). Az optikai jelet egy  $\lambda_1=1555,6\text{nm}$  ( $f_1=192,85\text{THz}$ ) hullámhosszon folytonos fényt kibocsátó lézer szolgáltatja. A lézer fénytéljesítménye  $1\text{mW}$ . A lézer jelére az NRZ módon kódolt információt egy külső AM modulátorral ültetem rá. Az AM moduláció megfelel egy OOK modulációnak, ha a modulációs mélysége 100%. Ezzel a megoldással állítottam elő az OOK jelet a szimulációban. A szimulációs elrendezésnek még tartalmaznia kell az ideális invertált jelet előállító blokkokat is. Ezek az ábrán a bekeretezett Inverted Signal részben helyezkednek el. A hibátlan invertált jel ismeretére szüksége van a programnak, hogy el tudja végezni a BER becslését a regenerátor kimeneti jelén. Az invertált jelet előállításához a PRBS generátor jelét használom fel. A PRBS jelet egy osztóval két részre osztom. Ez az osztás valójában egy jelmásolást jelent, az osztó a bemeneti jelet egy az egyben a két kimenetére helyezi. Az osztó után a PRBS jelsorozatát egy logikai inverter segítségével megnegálom. Az inverter utáni blokkok megegyeznek az adónál már ismertekkel, azonban az itteni lézer hullámhossza  $\lambda_2=1551,6\text{nm}$  ( $f_1=193,35\text{THz}$ ).



4.1. ábra. Egylépcsős XGM egenerátor szimulációs modellje a VPI-ban.

A bekeretezett Transmitter egységet követő blokk az átvitel során bekövetkező jeltorzulást hozza létre. A jelromlás szimulálása a jel-zaj viszony megváltoztatásán keresztül (OSNR – Optical Signal Noise Ratio) történik. Ennek során a jelhez fehérzajt adok hozzá. Az OSNR-t beállító blokk egy Galaxy elem a VPI-ban, azaz több blokkot foglal magába, ahogy azt a 4.2. ábra mutatja.



4.2. ábra A jel-zaj viszonyt beállító blokk belső felépítése

A blokkba bejövő zajmentes jel teljesítményét egy Powermeterrel megmértem, és ebből levonom a blokk paramétereit között megadott beállítandó OSNR nagyságát. A kivonás eredménye az előállítandó zaj nagysága lesz. Ez az OSNR számítására használt (4.1) összefüggés átrendezésével belátható, ahol  $N$  a zaj,  $S$  a jel. A fehérzaj generátor előállított zajt egy ideális erősítő felerősíti az előbb kiszámolt zajszintre. Az OSNR-t beállító blokkba bejövő zajmentes jelet és az előállított zajt összeadva, megkapjuk a blokk kimeneti jelét, ami egyben a regenerálandó torzult jel is. Az így előállított jel kerül a regenerátor bemenetére. A szimuláció helyes lefutásához, még szükséges az előállított jel típusát megváltoztatni, amit a regenerátor bemenete előtti blokk végez el.

$$\text{OSNR}^{\text{dB}} = 10 \cdot \lg\left(\frac{S}{N}\right) = S^{\text{dB}} - N^{\text{dB}} \quad (4.1)$$

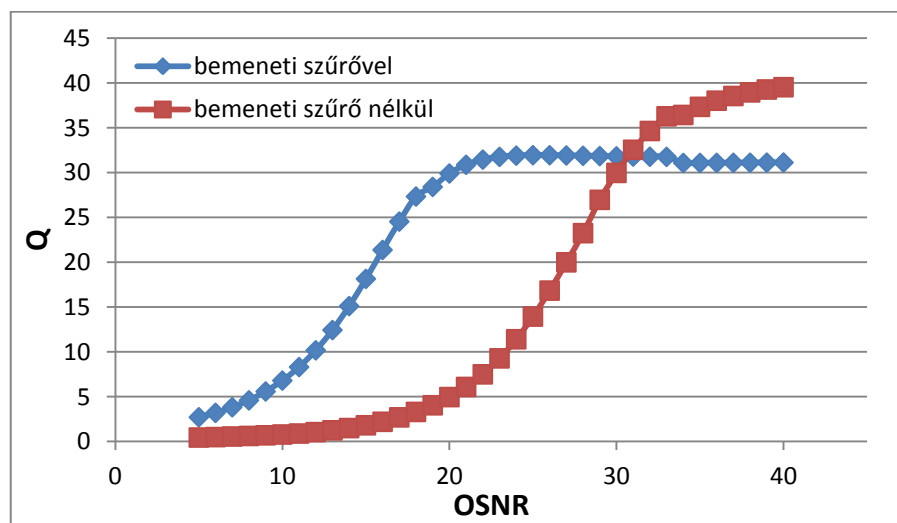
A regenerátor bemenetén egy 20dB-es erősítéssel rendelkező zajnélküli előerősítő található, ami az érkező „kis” intenzitású jelet felerősíti. Az erősítő után egy szűrő található, hogy a jelformálás során a jel a lehető legkevesebb zajt tartalmazza. A beérkező jel zaj tartalmát egy harmadrendű Bessel függvényű sáváteresztő szűrővel csökkentem le. A szimulációban használt szűrő 64,36nm (80GHz) sáv szélességű és az áteresztési tartomány közepe a  $\lambda_1$  hullámhosszra esik. A szűrő után a jelet egy osztó két azonos részre osztja. Egylépcsős regenerátornál erre az osztóra nincs szükség, ellenben a kétlépcsős modellnél ezen a ponton történik a bemeneti jel szétválasztása az XGM és az XGC nemlinearitás számára. Az osztó azért került bele a modellbe, hogy az egy- illetve kétlépcsős regenerátor elrendezése ahol lehet hasonló legyen, ahogy azt már említettem.

Az osztó felső ágáról a jel a kézzel keretezett Regenerator #1 (4.1. ábra) egységbe jut. Az XGM jelenség kihasználásához a SOA-ban szükség van egy másik  $\lambda_2=1551,6\text{nm}$  ( $f_2=193,35\text{THz}$ ) hullámhosszú CW lézere a regenerátorban. A CW lézer jelét és a regenerálandó jelet egy csatolóval összefogom és a két jel együtt kerül a SOA

bemenetére. A regenerálandó jel intenzitása 50mW, így a bemeneti jel fogja a SOA-t telítésbe vinni. A telített SOA-ban a két jel között létrejön az XGM jelenség, melynek következtében a  $\lambda_2$  hullámhosszú jelen megjelenik a  $\lambda_1$  logikailag negált jele. A regenerátor kimenetén csak a jelalakformált jelre van szükség, ezért a SOA után még el kell helyezni egy szűrőt, ami kiszűri az eredeti  $\lambda_1$  hullámhosszú jelet. A szűrő paraméterei megegyeznek a regenerátor bemenetén található szűrőével, de itt az áteresztési sáv közepe  $\lambda_2$  hullámhosszra esik. A további elemek a 4.1. ábrán a szimuláció helyes lefutásához szükségesek, valamint a jel vizsgálatát teszik lehetővé.

#### 4.1.2 Bemeneti jel-zaj viszony hatása a regenerálásra

A regenerálás minőségének és határának vizsgálatát a bemeneti OSNR értékének változtatásával lehet elvégezni. A szimuláció során azt a minimális jel-zaj viszonytal rendelkező bemeneti jelet kerestem, amin a regenerátor még elfogadható mértékű jelalakformálást képes végezni. Mivel a regenerátor csak 2R-t valósít meg, ezért a bemeneti jel időzírtési követelményeit nem vizsgáltam. A zajszint növelésével lesz egy olyan pont, ahonnan már nem lesz jelalakformálás, mert a zaj és a jel szintje majdnem azonos lesz.

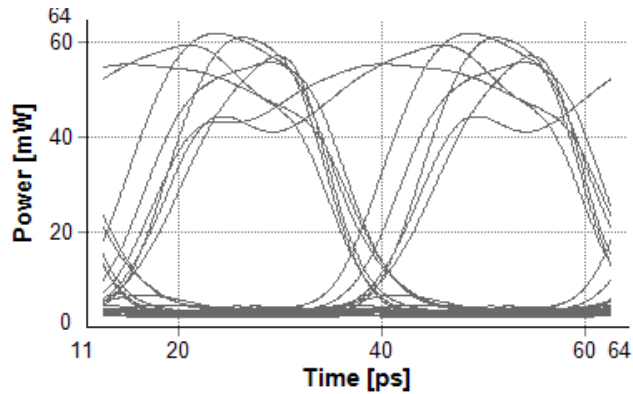


4.3. ábra. A kimeneti jósági tényező változása a bemeneti OSNR függvényében.

A regenerátor bemeneti jel-zaj viszonya 5-40dB között változott 1dB-es lépéssel. A szimulációt elvégeztem bemeneti szűrővel valamint azt mellőző regenerátor elrendezésre is. A két szimuláció jósági tényezőre vonatkozó eredményét a 4.3. ábra mutatja, mivel a Q tényező írja le legjobban a jelalakformálás minőségét. Mindkét elrendezés esetén megfigyelhető egy telítődés a jósági tényező értékeiben. A bemeneti szűrővel rendelkező regenerátornál ez már 23dB-nél megtörténik, míg a szűrő nélküli

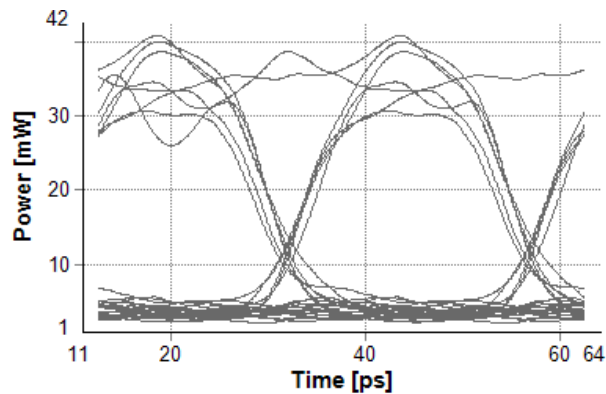
esetben a görbe telítése 38dB-nél kezdődik. A telítődést a SOA-ban lejátszódó XGM okozza. Az XGM jelenséggel létrehozott invertált jel jelalakja nem lesz tökéletes a SOA miatt [10], azon további jelalakformálást kell végezni, ahogy az a kétlépcsős esetben fog történni. Az ábráról leolvasható hogyan képes egy szűrő befolyásolni a regenerálás minőségét közel ideális esetben. 30dB-nél nagyobb OSNR nem fordul elő egy regenerátor bemenetén, így a 4.3. ábra eleje (5-30dB-ig) az igazán fontos. Jól látható, hogy egy bemeneti szűrővel rendelkező regenerátor sokkal hatékonyabb jelalakformálást képes végezni kis OSNR értékeknél, mint amikor a szűrőt elhagytam. Az OSNR növekedésével egyre több jelkomponens van a zajszint fölött, melyek mindegyike bekerül a SOA-ba, ha a regenerátor bemenetén nincs szűrő. A SOA bemenetére jutó jelkomponensek tartománya viszont nem változik, ha a bemenetén ott van a szűrő. Így hiába lesz egyre több jelkomponens a zaj fölött, ha azt a szűrő nem engedi át. A több jelkomponens tökéletesebb jelalakot eredményez, ami az invertált jel minőségét nagyban befolyásolja. A 4.3. ábrán pontosan ez látszik 30dB környékén. A sávkorlátozott bemenő jelnél a regenerátor nem tud profitálni zajszint csökkenéséből, míg bementi szűrő nélküli esetben a jelspektrum növekedésével az invertált jel minősége tovább javul egészen 38dB-ig, ahol a SOA korlátoz már.

A jelalakformálás határa 11dB-es bementi OSNR szintnél van, amennyiben a regenerátor rendelkezik bementi szűrővel. A becsült  $BER = 9,9 \cdot 10^{-24}$ , ami jóval a  $10^{-12}$ -es határérték felett van. Azonban nem szabad elfelejteni, hogy ez csak egy becsült érték, és a pontosabb BER becsléshez több mintára lett volna szükség. Ugyanis a VPI a BER értékét a szemábrából becsléssel határozza meg, ezért értéke nagyban függ attól, hogy mennyi impulzus található a szimulációs időablakban. A jósági tényezőt értéke  $Q = 8,31$  adódott. A regenerátor kimeneti szemábrája a 4.4. ábrán látható. A le- és felfutó élek között jelentős eltérések figyelhetők meg, valamint logikai egy szintje közel 20mW tartományban ingadozik. A logikai nulla szinten nagyobb zajosság figyelhető meg. Ez a jel invertálásából adódik, hiszen az eredeti jel ingadozó magas szintjei lekerültek a nulla szintre, és közben jelentősen csökkent a jelszint ingadozása.



**4.4. ábra. Bemeneti szűrővel rendelkező egylépcsős regenerátor kimeneti szemábrája, ha a bemenetén az OSNR = 11 dB.**

Bemeneti szűrőt nem tartalmazó regenerátornál a jelalakformálás határa az OSNR = 22 dB-nél van. Ez pont kétszerese a bemeneti szűrőt tartalmazó regenerátor határértéknek. Egy bemeneti szűrő elhelyezésével jelentősen megnövelhető a regenerátor működési tartománya. A becsült BER =  $6,1 \cdot 10^{-14}$ , míg  $Q = 7,5$ . A regenerátor kimeneti szemábrája a 4.5. ábrán látható. A magas jelszint ingadozása ez esetben 10mW és a logikai nulla szint az előző ábrához hasonló mértékben zajos. A nagyobb OSNR miatt a le- és felfutó élek között az eltérés kisebb, mint a 4.4. ábrán látott esetben.



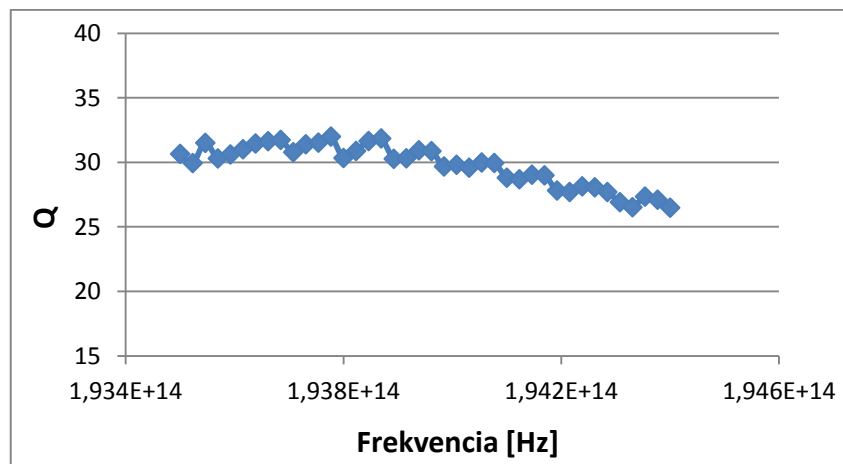
**4.5. ábra. Bemeneti szűrővel nem rendelkező egylépcsős regenerátor kimeneti szemábrája, ha a bemenetén az OSNR = 22 dB.**

### 4.1.3 Az invertált jel hullámhossza

A regenerátor működésének vizsgálatánál érdemes megnézni, hogyan befolyásolja a jelalakformálást az invertált jel hullámhossza. A hullámhosszban lefelé vagy fölfelé történő jelkonverzió előnyösebb-e a regenerálásnál? A [10]-[11] irodalmak alapján a felfelé történő XGM jelkonverziónál rosszabb jelregenerálás történik, mint az ellenkező irányú esetben. A VPI programban a lézer frekvenciáját kell megadni a

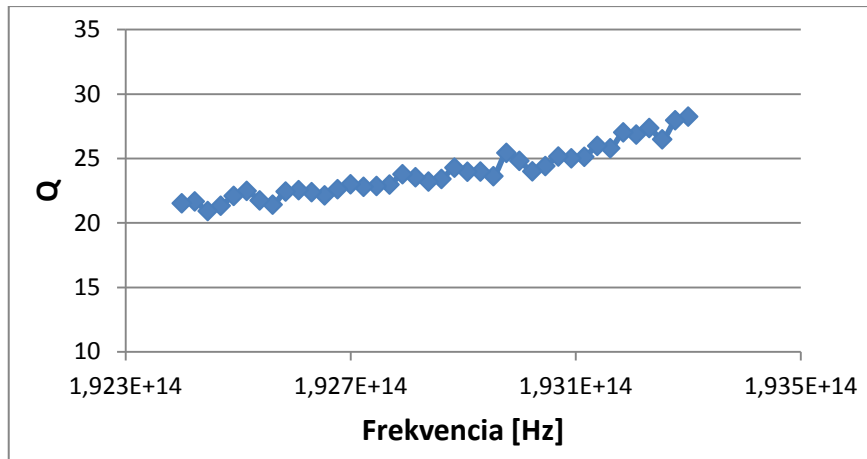
gyakorlatban használt hullámhossz helyett, ezért a következőkben a lézerek sugárzási helyei frekvencia egységben fognak szerepelni. A szimuláció elvégzéséhez a 4.1. ábrán látott elrendezést nem változtattam meg. A regenerátor egy 25dB jel-zaj viszonyú jelen végezte el a jelalakformálást. Lefelé irányban történő hullámhossz konverziónál az adó lézer 193,15THz-en sugárzott, és az XGM-hez használt lézer frekvenciája 193,5 – 194,4THz között változott. Felfelé irányban az adó 193,65THz-en sugárzott, az XGM lézer frekvenciája pedig az előzőhöz hasonló mértékben változott 193,3 – 192,4THz között.

A jósági tényező a 4.6. ábrán látható módon változik, ha a hullámhossz konverzió lefelé történik. A jósági tényező értéke 30-32 között ingadozik, amíg az invertált és az adó jele között 100 – 830GHz távolság van. Ez viszonylag nagy frekvencia tartomány, amelyen belül elhelyezhető az invertált jel. A 100GHz-es osztású DWDM rendszerekben, ez nyolc csatornányi helyet jelent. A Q értéke 193,98THz-től kezdődően fokozatosan csökkent, és a szimuláció végén a  $Q = 26,5$  értéket vette fel. A szimuláció alapján az invertált jelet nem célszerű túl távol helyezni az adólézertől, hiába lehetne ekkor egy enyhébb meredekségű szűrőt alkalmazni.



4.6. ábra. Lefele történő hullámhossz konverziónál a jósági tényező változása.

A fölfelé történő hullámhossz konverziónál a jósági tényező a fent említett irodalmaknak megegyezően rosszabbra adódott, mint lefelé történő hullámhossz konverziónál. A Q változását ez esetben a 4.7. ábra mutatja. A jósági tényező értéke folyamatosan növekszik, ahogy csökken az adó és az invertált jel közötti frekvenciatávolság, de a lehetséges legkisebb távolság esetén sem éri el a jósági tényező a  $Q = 30$  szintet. A 4.7. és 4.6. ábra megegyezik abban a tekintetben, hogy minél távolabb van egymástól az adó és az invertált jel frekvenciája, annál rosszabb a jelalakformálás.

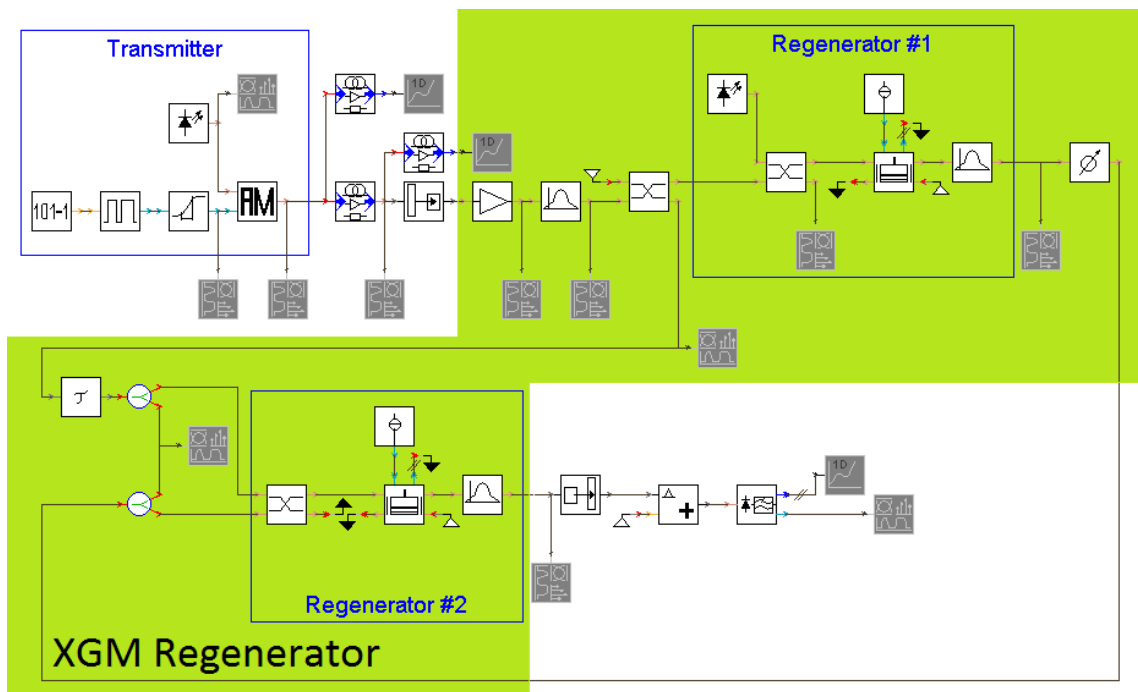


4.7. ábra. Fölfele történő hullámhossz konverzióánál a jósági tényező változása.

## 4.2 Kétlépcsős XGM regenerátor szimulációja

### 4.2.1 A szimulációs modell

A VPI-ban létrehozott kétlépcsős XGM regenerátort a 4.8. ábra mutatja. Alaposan megnézve az elrendezés sok mindenben hasonlít a 4.1. ábrán bemutatott elrendezéshez, csak ki lett egészítve még egy SOA-t tartalmazó egységgel, és az „Inverted Signal” blokk pedig elhagyásra került.



4.8. ábra. A szimulációhoz használt kétlépcsős XGM regenerátor blokkvázlata.

A fenti ábrán látható elrendezés teljesen megegyezik a Regenerator #1 egység előtti osztóig. Kétlépcsős regenerátornál már szükség van erre az osztóra, a 3.4.

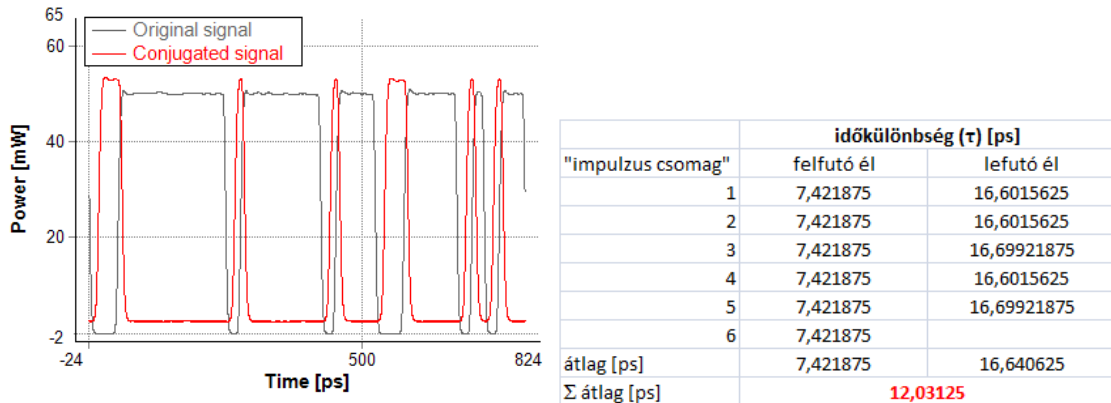
fejezetben ismertettek szerint. Az osztó felső ága megegyezik az egylépcsős regenerátorral. Az osztó alsó ágán a jelet  $\tau$  idővel késleltetni kell, hogy a Regenerátor #2 bemenetén a szűrt jel és a Regenerátor #1 kimeneti jele szinkronban legyen. A két jel közötti szinkron feltétele az XGC jelenség kialakulásának, és az így történő jelalakformálásnak. A második fokozatban (Regenerátor #2) csak az invertált jelre van szükség, ezért a Regenerátor #1 kimenetén el kell helyezni egy szűrőt, ami kiszűri az eredeti  $\lambda_1$  hullámhosszú jelet. A szűrő paraméterei megegyeznek a regenerátor bemenetén található szűrőével, azonban itt az áteresztési sáv közepe  $\lambda_2$  hullámhosszra esik. Az így előállított Regenerátor #1 kimeneti jele még áthalad egy csillapítón mielőtt a második fokozat bemenetére kerülne. A csillapítóra azért van szükség, hogy az invertált jel és a késleltetett jel ne csak szinkronban legyen egymással, hanem közel azonos amplitúdóval is rendelkezzenek. Ez közel állandó fényintenzitást hoz létre a második SOA-ban, ami szükséges a megfelelő mértékű XGC jelenség kialakulásához. A szimulációban az invertált jelet 1dB-el kellett csillapítani, hogy a második SOA bemenetén konstans bemenő jelszint legyen.

A második fokozatban (Regenerátor #2) a nemlineáris XGC játszódik le. A két jel együtt telítésbe viszi a SOA-t és létrejön köztük az XGC. A SOA kimenetén mindkét regenerált jel megjelenik, de ezek közül általában csak az egyikre van szükség, ezért a másikat egy szűrővel el kell távolítani. Legtöbbször hullámhossz konverzió nélküli regenerálás fogadható csak el, így a negált logikájú jelet kiszűrjük a regenerátor kimenetén. Ez a szűrő szintén azonos a Regenerátor #1 elején bemutatottal. A szűrő után a regenerátor kimenetén már csak a  $\lambda_1$  hullámhosszú regenerált jel található meg. A további elemek a 4.8. ábrán a szimuláció helyes lefutásához szükségesek, valamint a jel vizsgálatát teszik lehetővé. A regenerátorban használt két SOA azonos volt.

A helyes jelalakformálás egyik feltétele, a szinkronitás biztosítása a két jel között a Regenerátor #2 bemenetén. A szinkron biztosításához megmértem a Regenerátor #1 egység okozta jelkésleltetést. A késleltetés méréséhez egy analizátort helyeztem el a két rész közé, ami megkapja a negált és a bemenetről érkező késleltetés nélküli jelet is. A mérést zaj „nélküli” beállításoknál végeztem el, azaz az OSNR értéke 50dB volt a regenerátor bemenetén. A Regenerátor #2 bemenetére érkező két jelet az idő függvényében a 4.9. ábra mutatja. A regenerátor bemeneti jele (szürke) és az invertált jel (piros) közötti időkülönbséget jelölők segítségével mértem meg. A jelölőket a le- és felfutó élek közepére (kb. 26mW) helyeztem el. A mért értékek átlagát véve és



egész számra kerekítve kaptam meg a szükséges késleltetés nagyságát a szinkron állapothoz. A kapott késleltetés  $\tau = 12\text{ps}$ -ra adódott.

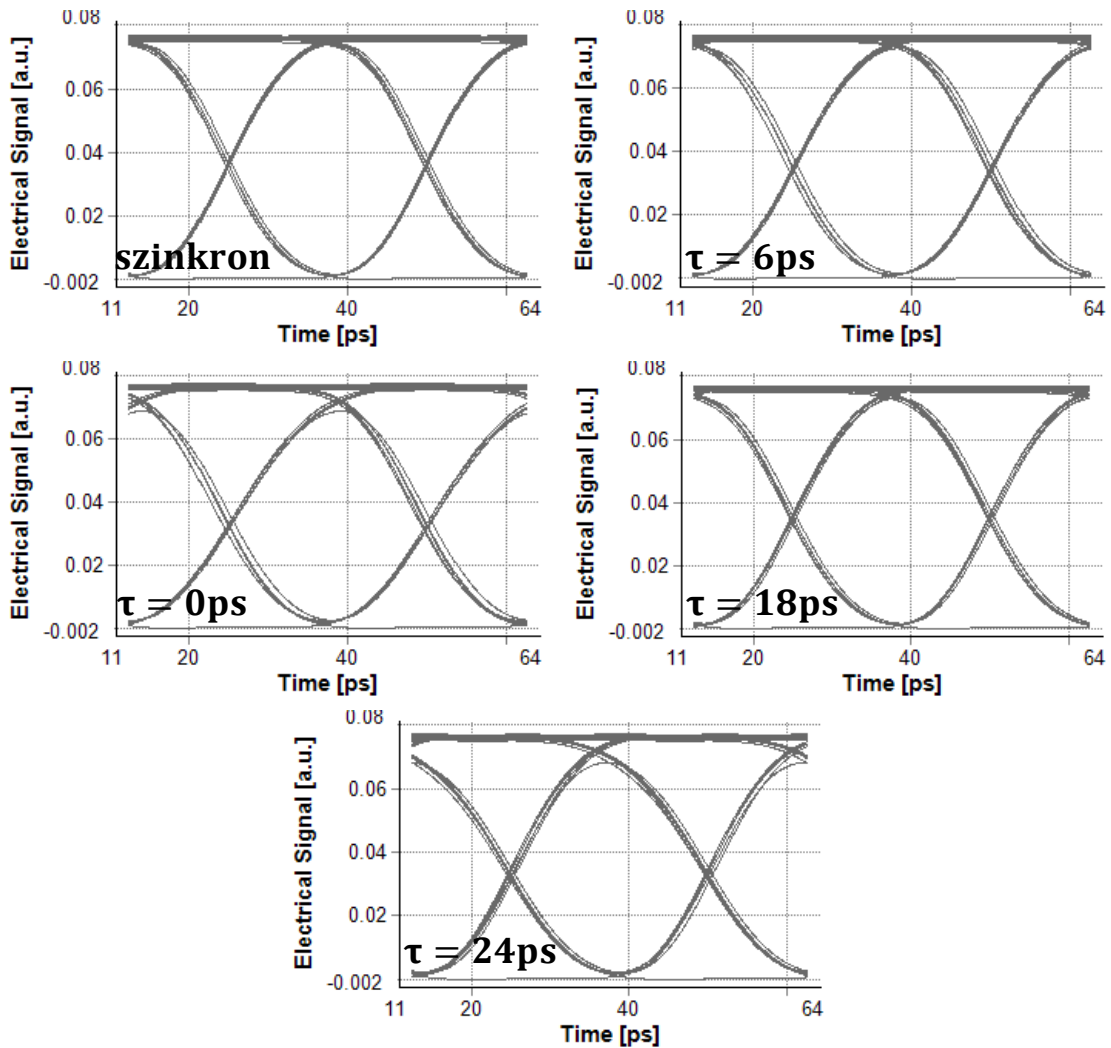


4.9. ábra. A Regenerator #2 bemenetén a szinkronizálatlan  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$  jel, valamint a jelváltások között mért késleltetési értékek.

#### 4.2.2 Szinkronizáció vizsgálata a Regenerator #2 bemenetén

A nemlineáris XGC lejátszódásánál fontos, hogy a két jel szinkronban legyen. Ebben a fejezetben azt vizsgálom, mennyire kell szinkronban lennie a két jelnek egymáshoz, hogy a regenerálás minősége még elfogadható legyen. A szimulációk során az előző fejezetben meghatározott késleltetéshez képest többet vagy kevesebbet állítottam be, és a regenerátor kimenetén a BER és Q értékének változását figyeltem. A szimulációknál a regenerátor bemenetén a jel-zaj viszony 25dB volt. Az eredményül kapott szemábrák a 4.10. ábrán láthatóak. A bal felső szemábra a szinkron esetet mutatja, ekkor  $\tau = 12\text{ps}$ . A regenerátor kimenetén egy hibátlan szemábra jelenik meg. A becslt BER nullának tekinthető, a jósági tényező pedig  $Q = 66,1$ . A következő szimulációnál a késleltetés értékét megfelezttem, így az invertált jel a 6ps-mal késlett a bemeneti jelhez képest a második fokozat bemenetén. A  $\tau = 6\text{ps}$ -hoz tartozó szemábra a 4.10. ábra felső sorának a jobb oldalán látható. A becslt BER ezen esetben is nullának tekinthető, és a Q értéke ( $Q = 44,9$ ) továbbra is kiváló, de valamelyest csökkent a szinkronizált esethez képest. A 4.10. ábra második sorának bal oldali szemábrája azt az esetet mutatja, mikor a bemeneti jelet egyáltalán nem késleltetem ( $\tau = 0\text{ps}$ ). Az ekkor kapott szemábra is hibátlannak tekinthető, bár már egy jól látható torzulás van benne. A 0-1 jelváltás lassabban történik, mint az 1-0, ami a szem egy kissé balra dőlését eredményezi. A BER továbbra is nullának tekinthető, viszont a Q értéke jelentősen lecsökkent, immáron  $Q = 20,2$ .

Az invertált jel nem csak késleltethető, hanem szinkronizálható is a bemeneti jelhez képest, ami ugyanúgy megakadályozhatja a helyes regenerálást. Az 4.10. ábra második sorának jobb oldali szemábrája a  $\tau = 18\text{ps}$ -hoz tartozik. Ekkor a bemeneti jel késleltetése 6ps-mal nagyobb a szükségesnél. A kapott szemábrák alakja nagyon hasonlít a  $\tau = 6\text{ps}$ -nál kapottéhoz, a jósági tényező  $Q = 46,1$ . A késleltetés további 6ps-mal való növelésével a jelformálás minősége tovább romlik. A jósági tényező értéke  $Q = 19,4$ , ami az elfogadhatóság határán van. A kapott szemábrák az 4.10. ábra alján láthatók.



4.10. ábra. A regenerátor kimenetén megjelenő szemábrák szinkronizáltak  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$  esetén, valamint  $\tau = 6, 0, 18$  és  $24\text{ps}$  késleltetésénél.

A jósági tényező változását a késleltetés függvényében a 4.1. táblázatban foglaltam össze. Az elvégzett szimulációk alapján az XGM regenerátor egyik kritikus pontja a szinkronizáció megléte az eredeti és az invertált jel között a Regenerator #2 bemenetén. A regenerátor a szinkronizáció hiányára sokkal érzékenyebb, mikor a bemeneti jel késik az invertált jelhez képest.

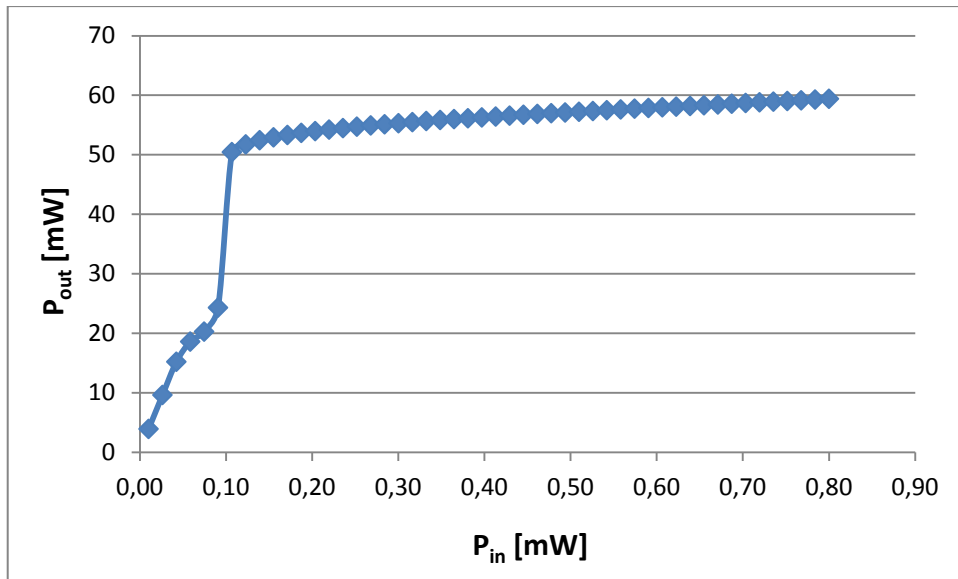
$\tau$ [ps]	$Q_{be}$	$Q_{ki}$
0	1,91	20,27
6	1,91	44,98
12 (szinkron)	1,91	66,12
18	1,91	46,12
24	1,91	19,49

4.1. táblázat. A jósági tényező változása a késleltetés függvényében.

### 4.2.3 Az XGM jelenség kialakulása

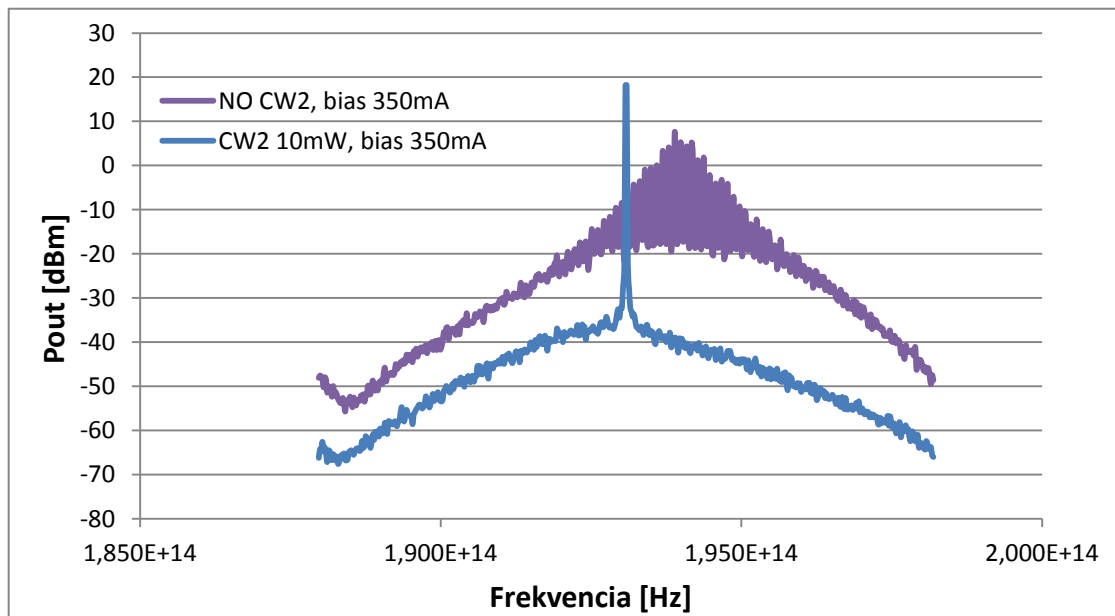
A 4.8. ábrán bemutatott elrendezés csak akkor működik regenerátorként, ha a SOA-kban fellépnek a nemlineáris jelenségek. Ennek feltétele viszont az erősítő telített állapota. A SOA-k telített állapotának a megléte a regenerátor másik kritikus pontja. Ebben a részben a Regenerator #1 blokkban létrejövő jelinverziót vizsgálom. Az XGM kialakulását a kétlépcsős modellnél érdemes vizsgálni, mert ekkor az is megfigyelhető miként viselkedik a regenerátor, ha az első fokozatában nem történik jelalakformálás.

Az XGM jelenség vizsgálatához szükséges ismerni a SOA átviteli karakterisztikáját, ami a 4.11. ábrán látható. A karakterisztika felvételénél a SOA bemenetére egy CW lézert helyeztem el, aminek a teljesítményét egyenletesen növeltem 0,8mW-ig. Az erősítő kimenetén az intenzitás nagyságát egy PowerMeter-rel mértem a szűrő után. A szűrő feladata a SOA széles sávú optikai zajának eltávolítása. A felvett átviteli karakterisztika alapján a SOA rendkívül kis tartományban lineáris, és kis jelszintek hatására is telítésbe kerül. A telített állapot körülbelül 0,12mW bemenő fényintenzitásnál kezdődik. A helyes szemábrával rendelkező invertált jel a SOA kimenetén ennél nagyobb bemenő jelszintnél fog megjelenni, hiszen nagyobb telítésnél erőteljesebb a nemlineáris hatás. A karakterisztika alapján a nyitott szemábrával rendelkező invertált jelnek 0,2-0,3mW-os bemenő jelszint környékén kell majd létrejönnie.



4.11. ábra. A szimulációban használt SOA-k átviteli karakterisztikája.

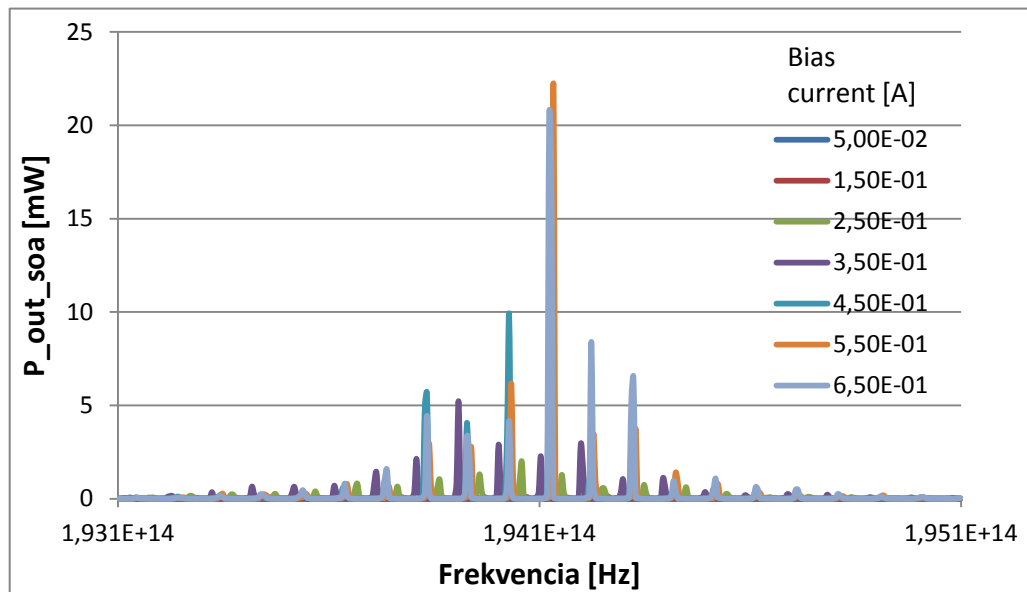
A 4.11. ábrán látott átviteli karakterisztika csak jellegében azonos egy általános SOA karakterisztikájával, ami a 2.1. ábrán volt látható. A karakterisztika alapján nem egy általános SOA van a regenerátorban, hanem egy telített állapotra optimalizált, hogy a lehető legkisebb bemenő jel hatására telítésbe kerüljön. Ez megnehezíti a pontos átviteli karakterisztika felvételét.



4.12. ábra. SOA kimenetén a spektrum, ha a bemenetén nincs jel (lila), illetve 10mW-os CW jel (kék) esetén.

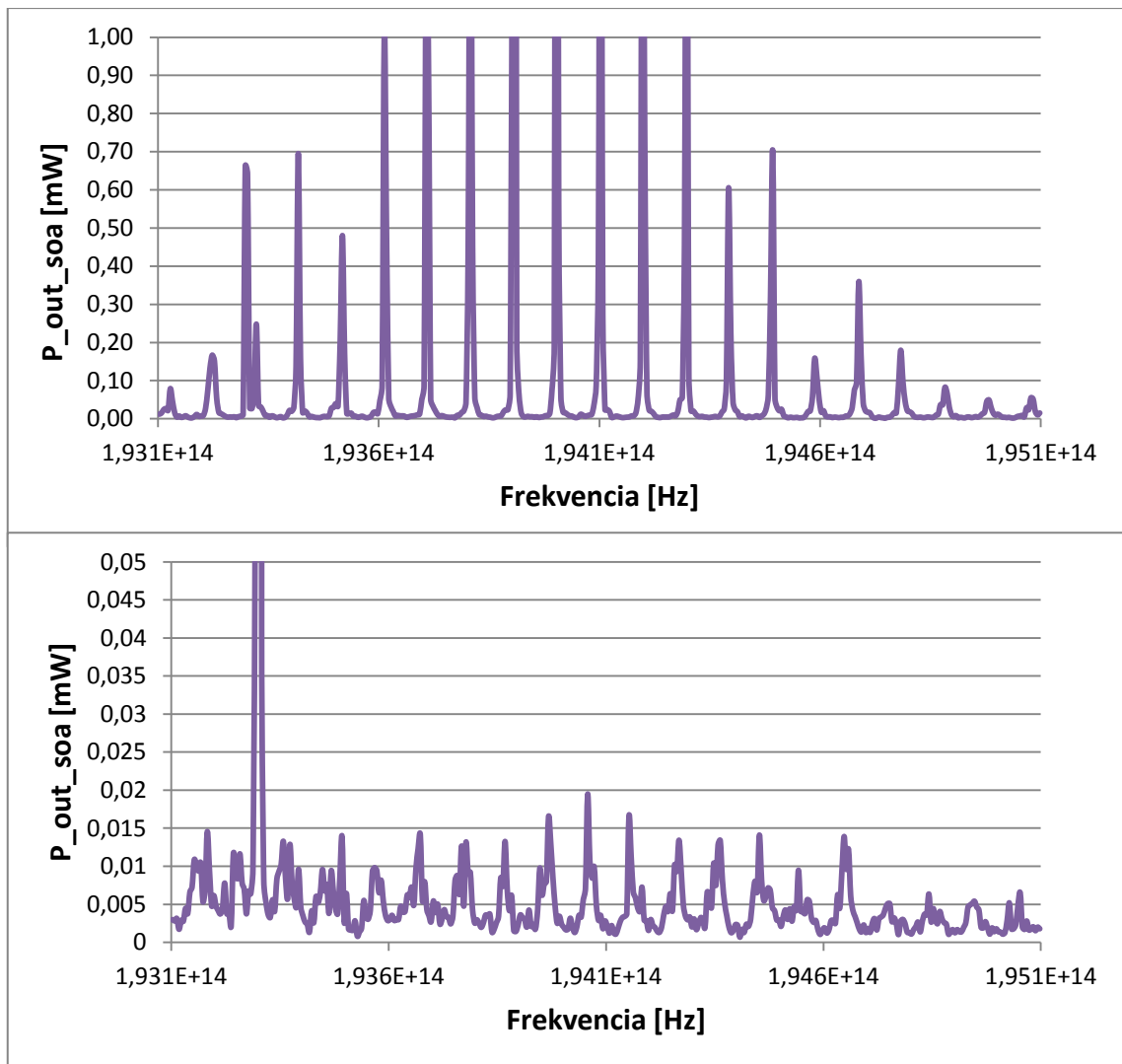
Az 4.12. ábrán lilával a SOA kimeneti spektruma látható, ha nincs a bemenetén jel. Ez a SOA zaja. A zaj 194THz környékén jellegre és nagyságra olyan, mintha a SOA egy lézer lenne, ami több rezonáns frekvencián is sugároz. A több frekvencián való

sugárzás viszont megszűnik (4.12. ábra kék görbéje) egy erőteljes bemenő jel hatására. Azaz a regenerátor telítésben lévő SOA-ja is csak a rákerülő jel hullámhosszán fog sugározni nagy intenzitással. A SOA zajspektrumát 194THz környékén a 4.13. ábra mutatja különböző tápáramok mellett. A tápáram növelésével egyre több frekvencián sugároz ki milliwattos intenzitású fényt a SOA. Ez a hatás 350mA-es bias áramnál kezdődik, addig elhanyagolható mértékű. Ettől kezdve a SOA egyre több frekvencián viselkedik sugárzó lézerként, ha nincs a bemenetén jel.



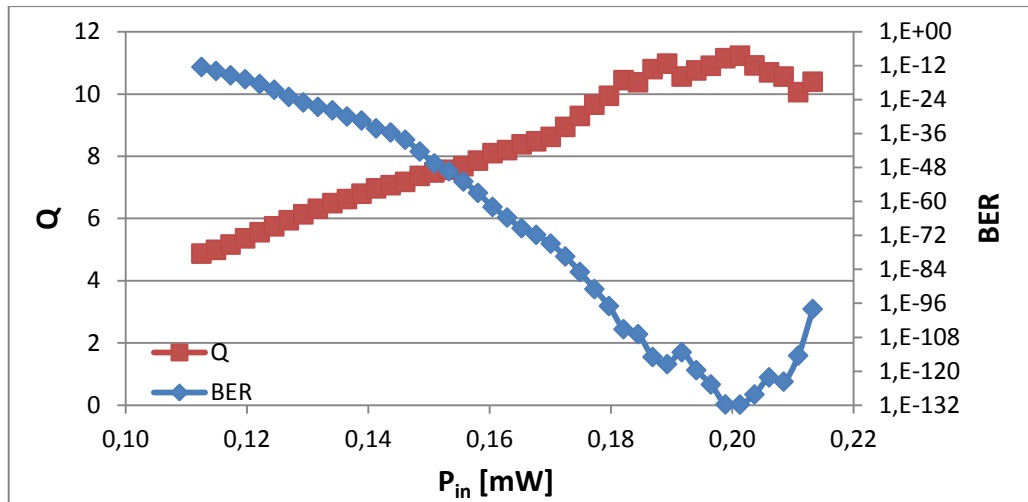
4.13. ábra. SOA kimeneti spektruma eltérő tápáramok esetén, ha a bemenetén nincs jel.

A SOA sugárzási frekvenciáin kisugárzott fény nagysága változik, míg az erősítő telítésbe nem kerül. Ezen változásokat a 4.14. ábra mutatja, de már csak a 350mA-es bias áramnál, mivel ekkora a regenerátorban található SOA-k tápárama is. A SOA bemenetére egy 193,35THz frekvenciájú 1 és 101 $\mu$ W-os jelet adtam.



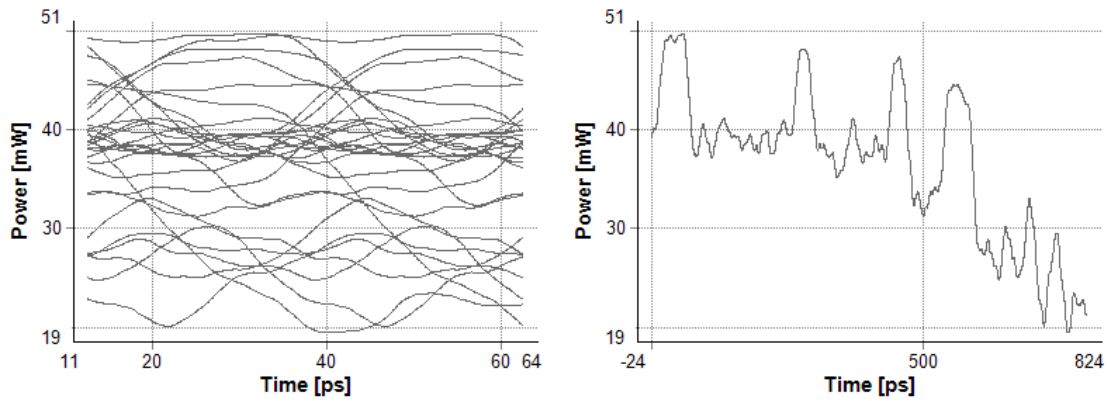
**4.14. ábra. A SOA kimeneti spektrumának változása, ha a bemenetére egy 1,9335e14Hz frekvenciájú jelet kerül 1 és 101 $\mu$ W-os teljesítménnyel.**

Az XGM jelenség kialakulásának vizsgálatához a 4.8. ábrán bemutatott elrendezést kicsit módosítottam. A kapcsolásból elhagytam az OSNR-t beállító blokkot és a regenerátor elején található előerősítőt. Az adó blokkban található lézer teljesítménye a szimuláció során 100 $\mu$ W és 2mW között változott, míg a regenerátoron belül található lézer teljesítménye 200 $\mu$ W volt. Ezen beállításokkal sikerült elérni, hogy a vizsgálat során a növekvő bemenő jel hatására kerüljön telítésbe a SOA, ne pedig már eleve ott legyen a CW lézer miatt.



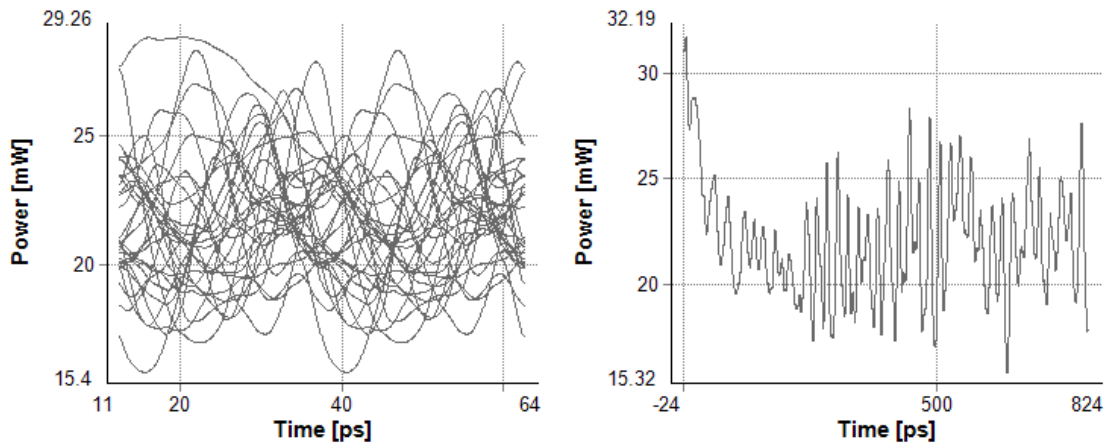
4.15. ábra. A jósági tényező (Q) és a hibaarány (BER) változása a regenerátor kimenetén.

A 4.15. ábra a Q és a BER változását mutatja a regenerátor kimenetén, ha az előbb ismertetett módon változik az első SOA bemenetén a fényintenzitás. Az ábrán látott értékeket azonban fenntartásokkal kell kezelni, ugyanis a szimuláció során a regenerátor működésének elve kis mértékben sérült, de az XGM kialakulásának megmutatása miatt erre szükség volt. Az első SOA kimenetén egy felerősített invertált jel található, ami közel egy nagyságrenddel nagyobb az eredeti bemenő jelnél. Így a második SOA bemenetén nem fog teljesülni a feltétel, hogy a bemenetén a jelszint konstans legyen. Ez rosszabb XGC hatást fog eredményezni, ami akár a regenerálás minőségét is ronthatja. A Q és BER emiatt van csak 0,22mW bemenő teljesítményig ábrázolva a 4.15. ábrán. A kezdeti 50 $\mu$ W-os AM jelből (az adó CW lézer teljesítményének a fele az OOK moduláció miatt) az első SOA (SOA1) bemenetére 12,5 $\mu$ W jut. A SOA-t telítésbe vivő CW lézertől az osztó következtében 100 $\mu$ W jut a SOA1-re. Az 4.11. ábra alapján ekkor a SOA lineáris szakaszának a végén vagyunk, de még nincs telítésben a SOA. A SOA1 kimenetén még nincs értékelhető szemábra, de a jel alakjában már felfedezhetők a nemlinearitás következtében kialakuló invertált jel impulzusai a zajban, ahogy az 4.16. ábrán látható.



**4.16. ábra. SOA1 kimenetén az invertált jel szemábrája és jelalakja 112,5 $\mu$ W-os bemenő fényintenzitásnál.**

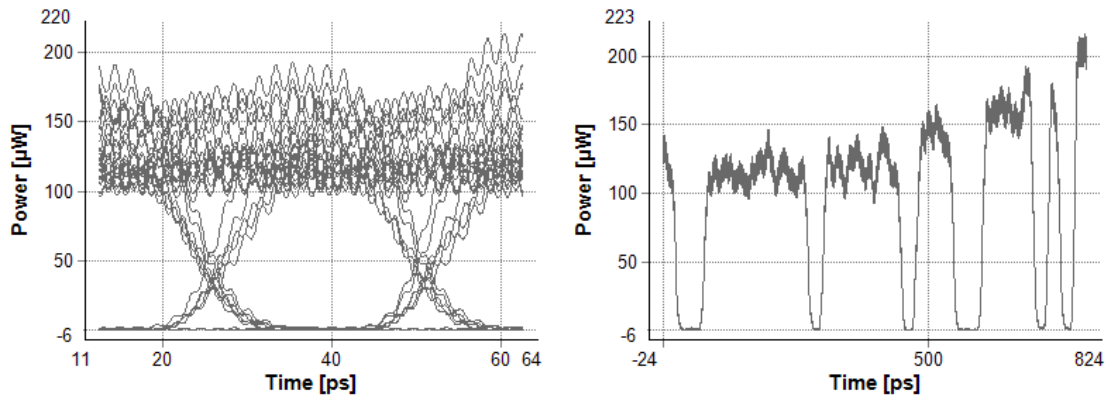
Ennél kisebb bemenő jelszintnél a SOA1 kimenetén csak a zaj figyelhető meg, ahogy a 4.17. ábrán látható.



**4.17. ábra. SOA1 kimenetén az invertált jel szemábrája és jelalakja 106 $\mu$ W-os bemenő jelszinnél.**

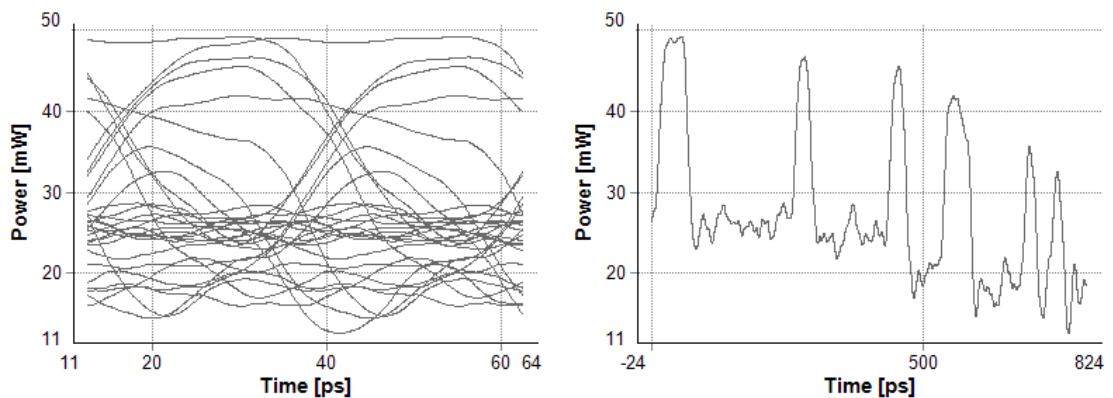
A regenerátor kimenetén a hiányzó invertált jel ellenére megjelenik a „regenerált” bemeneti jel. Ezen a jelen azonban nem történt jelalakformálás. A kimeneti jel nem más mint a második fokozat bemenetén található késleltetett bementi jel felerősítve. A regenerátor szimpla erősítőként viselkedik, amíg a SOA1-ben létre nem jön a jelinverzió. A szemábrán és az impulzus sorozaton is jól kivehető a SOA ASE zajának a jelre kerülése, ahogy azt a 4.18. ábra mutatja. Az impulzussorozaton látható szintnövekedés oka, hogy a második SOA (SOA2) telítésben van a SOA1-től érkező jel miatt. A SOA1 jelszintjének csökkenése kisebb telítést eredményez, ami erősítés növekedést fog okozni a másik jelen.





**4.18. ábra.** A regenerátor kimenetén a szemábra és a jelalak, ha a SOA1 bemenetén a fényintenzitás  $112,5\mu\text{W}$ .

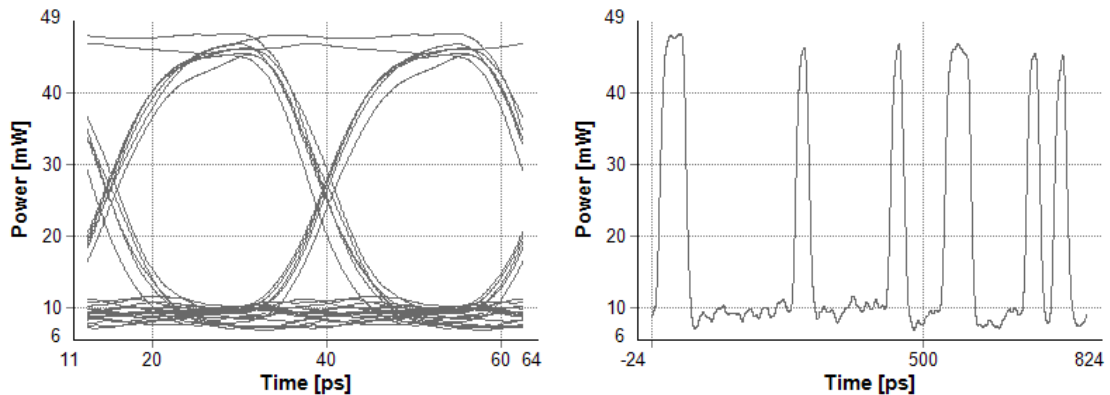
A SOA1 bemenetén a jelszint növelésével az erősítő telítésbe fog kerülni és megjelenik a SOA1 kimenetén a negált jel. A SOA átviteli karakterisztikája alapján a telítődés kezdeténél,  $0,12\text{-}0,13\text{mW}$ -nál, kell a SOA1 kimenetén megjelennie az invertált jelnek. A kimeneten kapott jel zajszintje még elég magas, ahogy a 4.19. ábrán látható. Az oszcilloszkóp képén ugyan már kivehető az invertált jel, de a hozzá tartozó szemábra még zárt, csak körvonalakban látszik a szem. A regenerátorként való működéshez, ennél nagyobb telítésre van szükség a SOA1-ben. A 4.15. ábrán a  $Q$  értékében egy meredekebb javulás figyelhető meg  $0,18$  és  $0,2\text{mW}$  bemenő teljesítmény között. Ez az a jelszint, ahol a SOA már eléggé telített állapotban van ahhoz, hogy a kimenetén megjelenő invertált jel további jelalakformálásra legyen használható a SOA2-ben.



**4.19. ábra.** SOA1 kimenetén az invertált jel az erősítő telített állapotának a kezdetén.

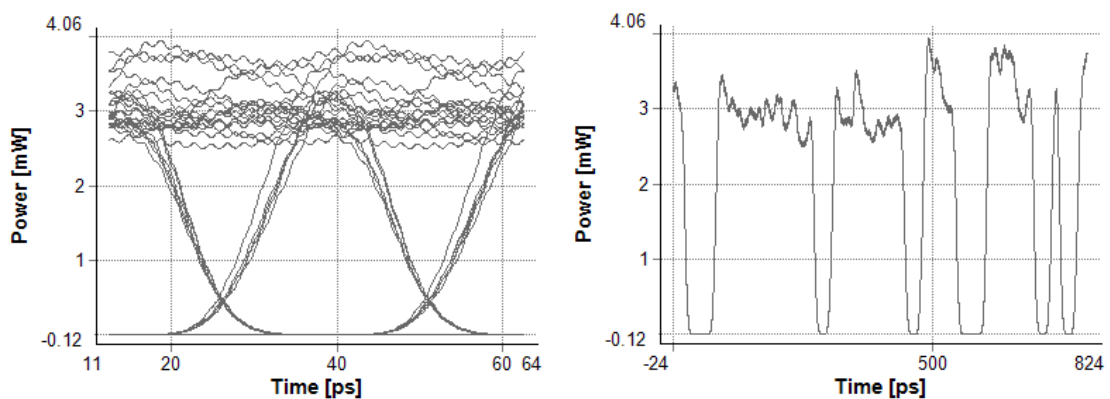
A kimeneti jel a  $Q = 11$  értéket először  $0,2\text{mW}$ -os SOA1 bemenő teljesítménynél veszi fel. Ekkor a SOA már a telített állapotban van és kisebb jelingadozások hatására sem kerül ki onnan. A SOA1 kimeneti szemábráját és jelsorozatát a 4.20. ábra mutatja. A szemábra immár teljesen nyitott, szemben az előző

ábrán látottal, valamint kisebb a zaj szintje és ingadozása. A jel kis mértékben jitteres, de a fel- és lefutó éleket lehet együtt haladónak tekinteni. A magas jelszintek nagysága pedig egyforma, nem úgy mint a 4.19. ábrán látott esetben.



4.20. ábra. SOA1 kimenetén az invertált jel, ha a bemeneti fényintenzitás nagysága 0,2mW.

A regenerátor kimenetén megjelenő jelsorozat és a hozzátartozó szemábra a 4.21. ábrán látható. A kimeneten egy nyitott, szinte jitter mentes szemábra jelenik meg. A magas jelszinten azonban közel 1mW-os ingadozás van, ennek oka a már említett jelentős jelszintkülönbség a SOA2 bemeneti jelei között. Ilyen jelszintkülönbség mellett az XGC nem tud tökéletes jelszint kiegyenlítést létrehozni. A regenerátor 0,18mW és annál nagyobb SOA1 bemenő teljesítménytől kezdődően már nem csak erősítést, hanem jelalakformálást is végezni fog a bemenetére érkező jelen.

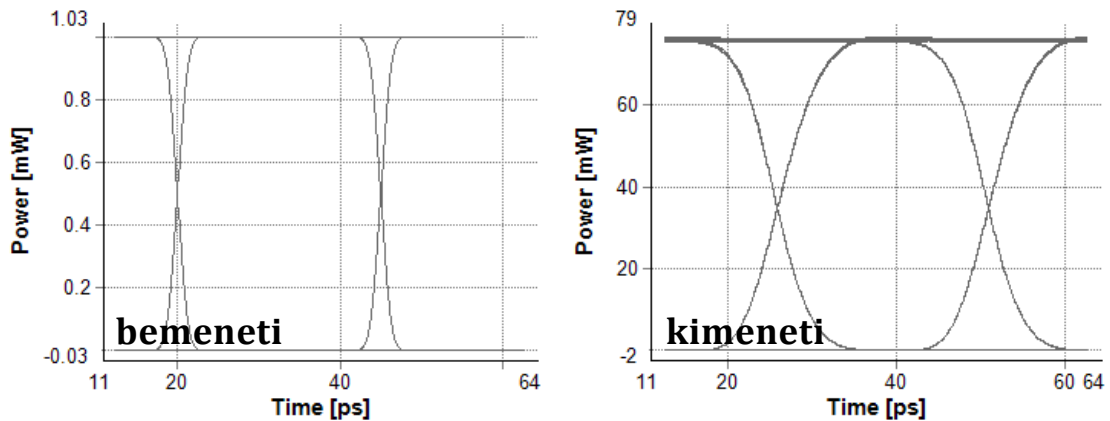


4.21. ábra. A regenerátor kimenetén a szemábra és a jelsorozat, ha a bemeneti fényintenzitás nagysága 0,2mW a SOA1 bemenetén

#### 4.2.4 Jel-zaj viszony hatása a regenerálásra

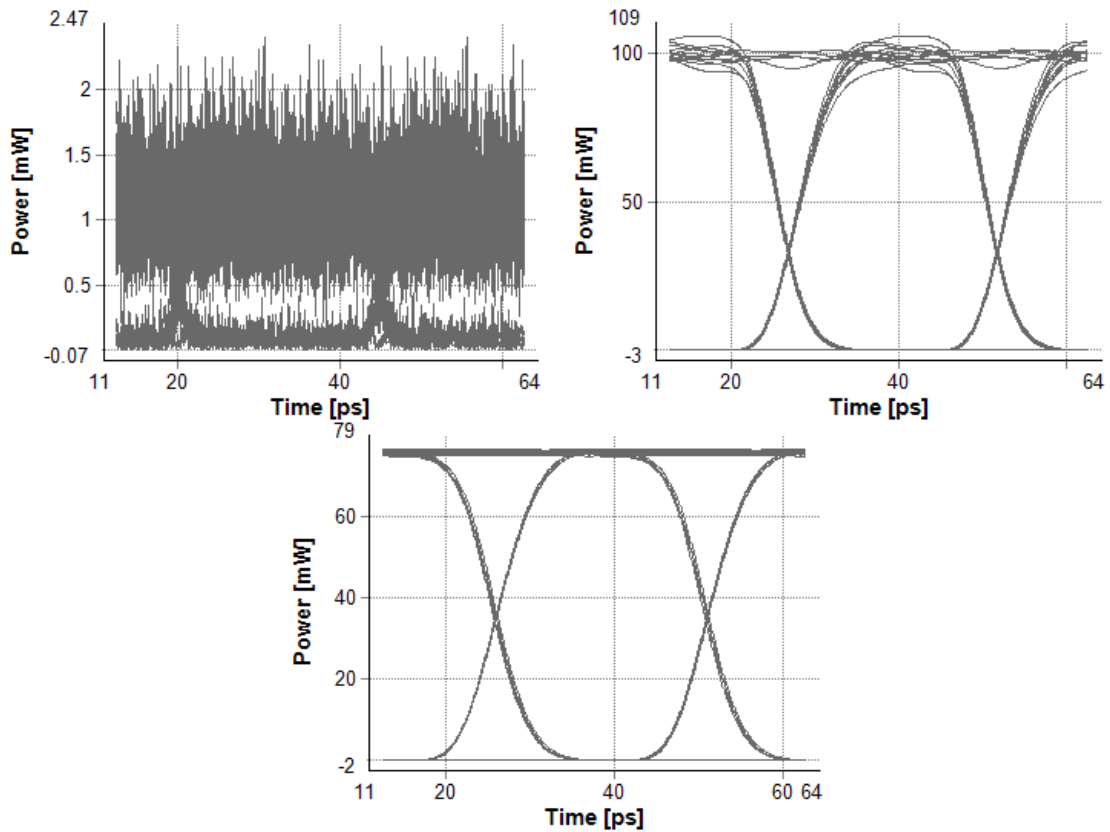
A regenerálás minőségének vizsgálata az egylépcsős elrendezéshez hasonlóan történt, de itt két külön fejezetben vizsgálom a bemeneti szűrőt és az azt mellőző elrendezést. A regenerálás minőségének változását részletesebben vizsgálom kétlépcsős

esetben, hiszen a kétlépcsős XGM regenerátor alkalmazásának jóval nagyobb a valószínűsége, mint az egylépcsősé.



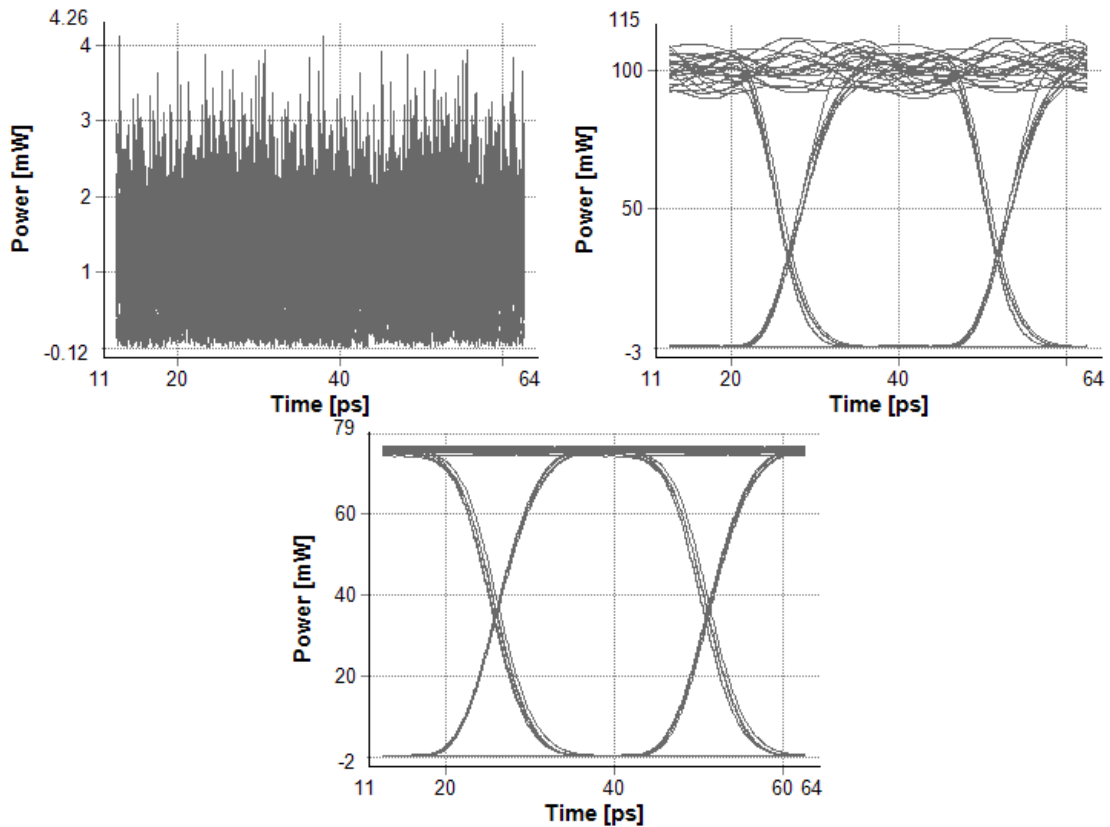
4.22. ábra. A regenerátor bemenő és a kimenő jelének a szemábrája, ha a bemenő jel ideális.

Elsőnek azt az esetet vizsgáltam, amikor a regenerátor bemenetére egy „zajnélküli” jel kerül. Ehhez a 4.8. ábra elrendezéséből kivettem az OSNR-t beállító blokkot. A „zajtalan” jel szimulációjával megmutatható, hogy a regenerátor nem csak javítani, hanem rontani is képes a jelalakon a zajos SOA-kból adódóan. A regenerátor bemenetére adott jel jósági tényezője  $Q = 183,6$ , míg az  $OSNR = 98,6\text{dB}$  volt. A jelhez tartozó számábra a 4.22. ábra bal oldalán látható. A bemenő jel egy teljesen ideális jel volt. A regenerátor ezen már nem tud, és nincs is mit javítania. A jelen egy erősítést fog végrehajtani, ami a zaj növekedését is eredményezni fogja, hiszen a SOA-k nem zajtalan eszközök. A regenerátor kimenetén a szemábra a 4.22. ábra jobb oldalán látható. Az ábrán látható két szemábra nagyon hasonló, ha eltekintünk az eltérő magas jelszinttől. A két szemábra között azonban apróbb eltérések figyelhetők meg. A kimeneti szemábra veszített a szögletességéből, a jelváltások lassabb meredekséggel történnek, mint a bemeneten. Ennek oka a SOA működési sebessége, az erősítő ilyen időintervallummal képes a 0-1 (1-0) jelváltást létrehozni. A másik eltérés, hogy a SOA zaja megjelenik a magas jelszinten a regenerátor kimenő jelében. Ez a szemábra felső vastagabb vonalában mutatkozik meg. A SOA zaja és „lassúsága” okozta jelromlás a kimeneten megjelenik a  $Q$  és az  $OSNR$  értékében is. A kimeneten a jósági tényező  $Q = 98,1$ , míg az  $OSNR = 66,3\text{dB}$ .



**4.23. ábra. Regenerátor bemeneti, szűrő utáni, és kimeneti jelének a szemábrája, ha az OSNR = 30dB.**

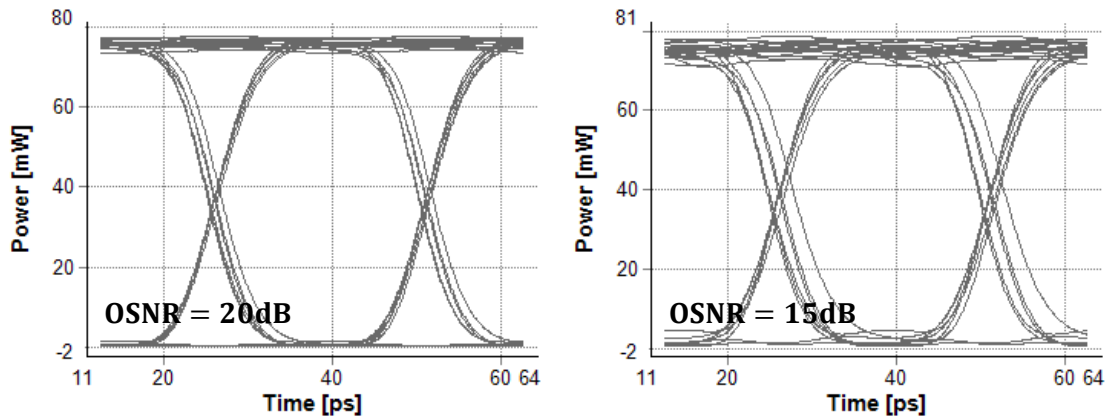
Az ideális jel vizsgálata után futtatott szimulációban, a bemeneti jel-zaj viszonyt 5dB-ről decibelenként növeltem 30dB-ig. Az OSNR = 30dB-nél a bemeneti jel szemábrája a 4.23. ábra bal oldali részén látható. A bemeneti jelen lévő fehér zaj szinte csukottá teszi a szemábrát. Ezen egy szűrő elhelyezésével jelentősen lehet javítani, ahogy az ábra jobb oldalán látszik. A jobboldali szemábra a regenerátor bemenetén található szűrő után készült. A szűrő a zaj jelentős részét kiszűri, hisz az a jel sávján kívülre esik. A tovább haladó jelben csak a jelel azonos frekvenciára eső zajkomponensek maradnak. Ez a magas jelszinteken néhány milliwattos ingadozást okoz, és elhanyagolható mértékű eltérést fel- és lefutó élekben. A 4.23. ábra alsó szemábrája a regenerátor kimenetén megjelenő jelé. A kapott szemábra hibátlan. A kimeneti jel szinte zajtalan, bár az ábra vastagabb felső vonala kisebb zaj jelenlétére utal. A jel jósági tényezőjének az értéke 80, a becsült BER pedig nulla volt.



4.24. ábra. Regenerátor bemeneti, szűrő utáni, és kimeneti jelének a szemábrája, ha az OSNR = 25dB.

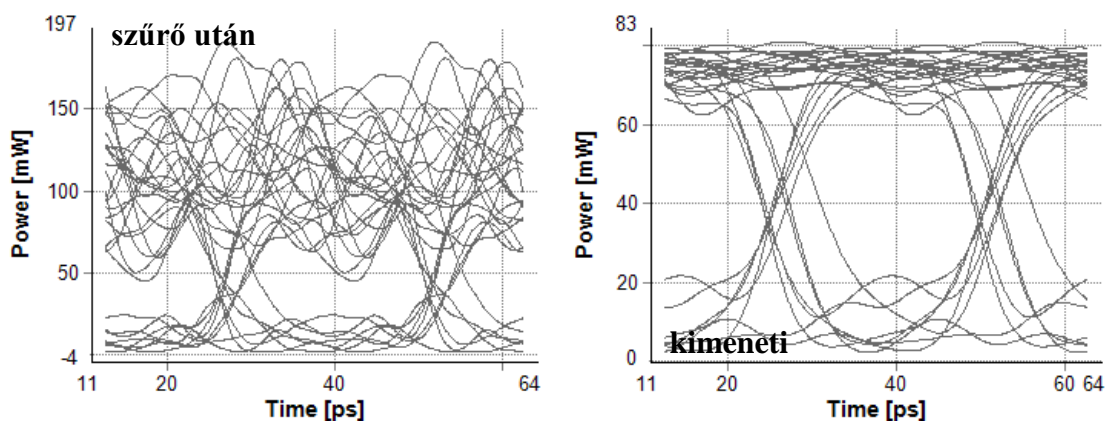
A regenerátor be- és kimeneti jelének a szemábráját mutatja a 4.24. ábra 25dB-es bemeneti OSNR értéknél. A bemeneti jelen már akkora a zaj, hogy a hasznos jel tartományára hangolt szűrő nélkül nem is detektálható. A bemeneten a szemábra zárt, amin, egy szűrő segítségével megint jelentősen lehet javítani. A szűrő után a jel magas szintjein nagyobb ingadozás figyelhető meg, mint az előbbi esetben. A kimeneti jel szemábráján a lefutó élek időben kissé jobban eltérnek egymástól, mint az előző ábrán. Ez az eltérés a  $Q$  értékében is megmutatkozik ( $Q = 65$ ), miközben a zaj nagysága nem változott jelentősen az ábra alapján. A BER továbbra is nullának tekinthető.

Az jel-zaj viszony további csökkentésével a kimeneti szemábrán megnövekszik a magas jelszinteken az ingadozás mértéke, valamint a le- és felfutó élek időben nagyobb szóródást fognak mutatni. A bemeneti 20 és 15dB-es OSNR-hez tartozó kimeneti szemábrák a 4.25. ábrán láthatóak. A hozzájuk tartozó jósági tényező értéke:  $Q_{20dB} = 46,2$  és  $Q_{15dB} = 24,2$ . A BER gyakorlatilag nullának vehető a két esetben.



4.25. ábra. A regenerátor kimeneti jelének a szemábrája, ha a bemenő OSNR = 20, 15dB-el.

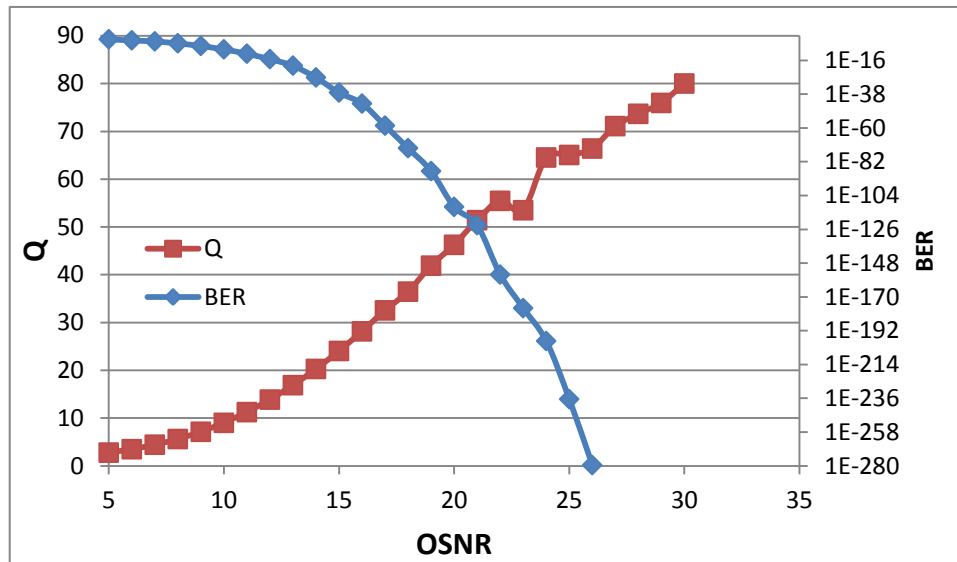
A 4.26. ábrán a jelalakformáláshoz minimálisan szükséges bemenő jel-zaj viszonyhoz tartozó szűrő utáni és kimeneti jel szemábrája látható. A bemeneten ekkor az OSNR = 10dB. Egy szűrő használatával már nem lehet akkora jeljavulást elérni, mint ahogy a 4.23. vagy a 4.24. ábra esetén volt látható. A zaj szintje a jel tartományában is nagy, amit szűrővel nem lehet kompenzálni. Regenerátor alkalmazásával, még egy ilyen zajos jelből is értékelhető kimeneti jel hozható létre. A kimeneti jel még számottevő zajt tartalmaz, de a magas jelszint ingadozása kb. 10mW-ra csökkent a bementi 100mW-ról. A regenerátor csak 2R jelalakformálást végez, így a zaj okozta fel- és lefutó élek időbeli szóródását nem tudja helyreállítani, de az élek meredekségét azonosá teszi. A kimeneten a  $Q = 8,9$ , míg a becsült BER =  $1,5 \cdot 10^{-9}$ . A kétlépcsős regenerátornál kapott működés határához tartozó OSNR 1dB-el kisebb, mint az egylépcsős esetben.



4.26. ábra. A bemeneti szűrő utáni és a kimeneti jel szemábrája, ha az OSNR = 10dB.

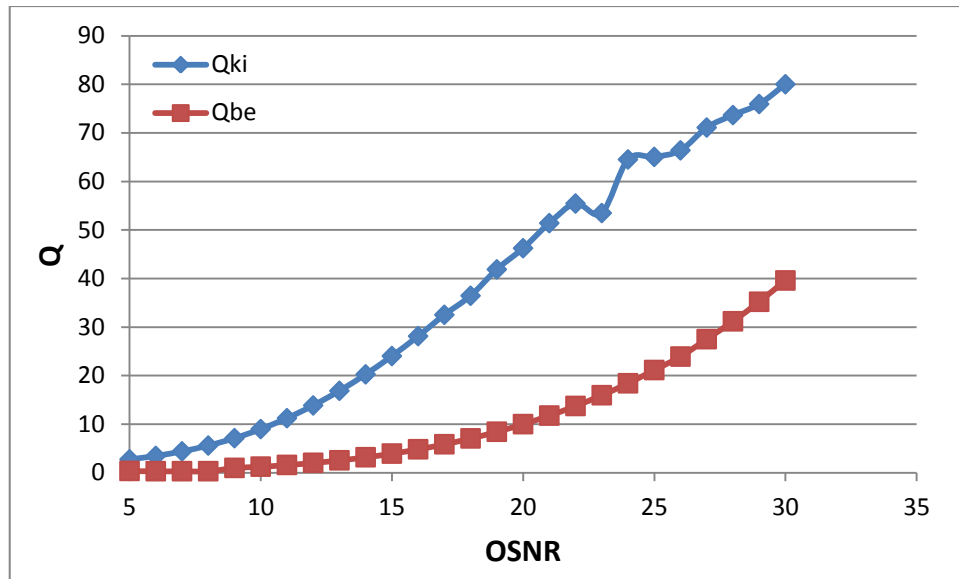
A kapott eredményeket az alábbi két grafikonon lehet összefoglalni. A 4.27. ábra a kimeneten a  $Q$  és a BER értékét mutatja a bemeneti OSNR függvényében. A

szimuláció eredményeül a BER függvényre jellemző erfc jellegű görbe adódott. A görbe apró törései a becslés pontatlanságából adódnak. A Q görbéje egy lapos parabola görbéhez hasonló. Kis bemeneti OSNR esetén a Q értéke nullához közeli, azonban az OSNR viszony javulásával a Q értéke egyre nagyobb a kimeneten.



4.27. ábra. A regenerátor kimenetén a BER változása a bemeneti OSNR függvényében.

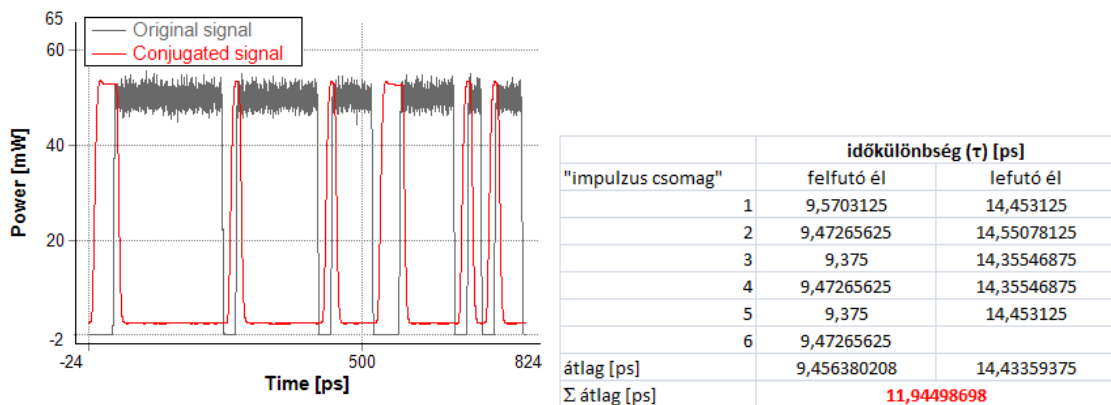
A bemeneti és kimeneti Q görbe a 4.28. ábrán látható. A bemeneti Q értékének felvételéhez a regenerátor bemenő jelét két részre osztottam egy ideális osztóval, és az osztó másik végére a regenerátor kimenetén található detektorhoz hasonlókat helyeztem el. Kis jel-zaj viszonyok esetén a két görbe egymáshoz közel helyezkedik el. Az OSNR növekedésével a regenerátor egyre hatásosabb jelalakformálást fog végrehajtani, ami a két görbe távolodását okozza. Ez a távolodás az OSNR = 25dB környékén megszűnik és a két görbe párhuzamosan halad tovább. A különböző OSNR viszonyokra elvégzett szimulációk alapján megállapítható, hogy a helyes jelalak formáláshoz a regenerátor bemenetén 10dB-nél nagyobb OSNR-rel rendelkező jelnek kell lennie. Az egylépcsős elrendezésben látott telítés a Q értékében itt is létrejön 45dB-es bemeneti OSNR-nél. Egylépcsős esetben a  $Q \approx 32$  volt. Kétlépcsős elrendezés jósági tényezője ennek körülbelül a duplája  $Q \approx 65$ , ha az OSNR = 25dB. Egy második fokozat elhelyezésével a regenerált jel minősége könnyen megduplázható.



4.28. ábra. A regenerátor be- és kimenetén a jóságítényező értéke az OSNR függvényében.

#### 4.2.5 Bemeneti szűrő nélküli regenerátor

Az eddigi szimulációknál egy szűrő volt elhelyezve az előerősítő után (4.8. ábra), hogy a jelregenerálás a lehető legkisebb zaj mellett történjen. A szűrő elhagyásával a regenerátor előállítási költsége kisebb lesz, ami olcsóbb eladási árat tesz lehetővé. Ha a most elhagyott szűrő speciális volt, akkor jelentős árkülönbség lehet a két megoldás között, miközben belsejünkben szinte azonos a két regenerátor.

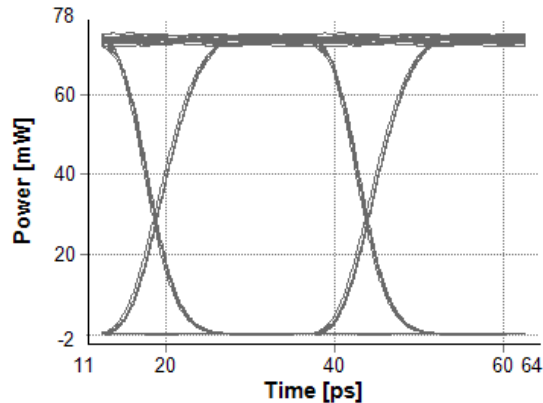


4.29. ábra. A Regenerátor #2 bemenetén a szinkronizálatlan  $\lambda_1$  és  $\lambda_2$  jel, valamint a jelváltások között mért késletetés értékek..

A Regenerátor #2 bemenetén lévő jelek közötti késletetés ettől nem fog megváltozni, hisz a szűrő a jel kettéosztása előtti szakaszon volt. Ellenőrzésképpen azért most is megmértem a két jel közötti időkülönbséget, hasonlóan a 4.2.1. fejezetben történthez. A két jel közötti késletetés ugyanúgy 12ps-ra adódott, ahogy az a 4.29. ábrán

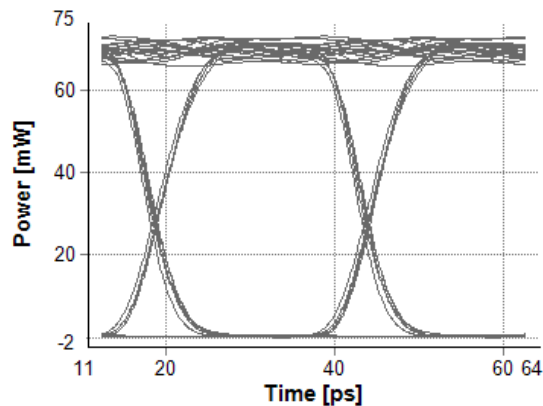


látható. Az eltérés a mostani és a szűrővel mért késleltetés között bőven a hibahatáron belüli.



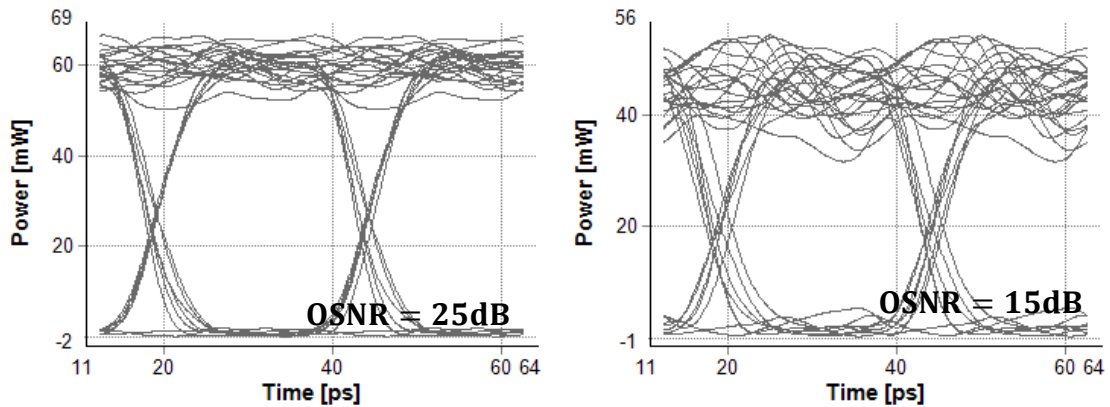
**4.30. ábra. Regenerátor kimenetén a szemábra, ha a bemeneten az OSNR = 30dB.**

Az előző fejezet szimulációit a bemeneti szűrőt nem tartalmazó elrendezésre is elvégeztem. A bemeneti OSNR = 30dB értékhez tartozó kimeneti szemábra a 4.30. ábrán látható. A kimeneten egy hibátlan szemábra jelenik meg és a  $Q = 63,4$ . Összevetve a bemeneti szűrővel rendelkező regenerátor hasonló esetben kapott szemábrájával (4.23. ábra), az egyetlen különbség a kicsit nagyobb zaj a magas jelszinteken.



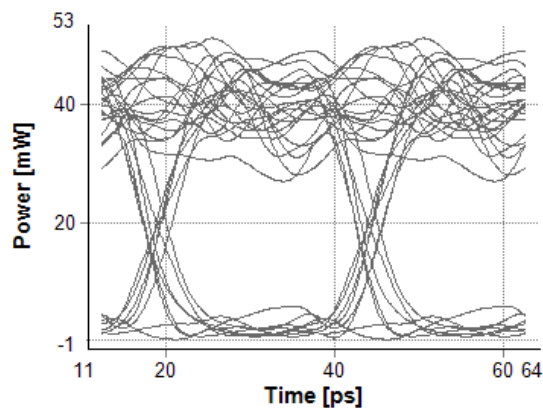
**4.31. ábra. Regenerátor kimenetén a szemábra, ha a bemeneten az OSNR = 25dB.**

A 4.31. ábra a kimeneti szemábrát mutatja az OSNR = 25dB beállításnál. A zajszint növekedésével tovább nőtt a jelszint ingadozása a magas szinteken, és kis mértékben (kb. 3mW) csökkent a szemábra nagysága. A mért jósági tényező értéke:  $Q = 42$ , míg a becsült BER értéke nulla, hasonlóan az előző ábra értékéhez. A szemábra párja az 4.24. ábrán látható. A két szemábra továbbra is csak a magas jelszinteken lévő zaj nagyságában tér el egymástól.



4.32. ábra. Regenerátor kimenetén a szemábra, ha a bemeneten az OSNR = 20 illetve 15dB.

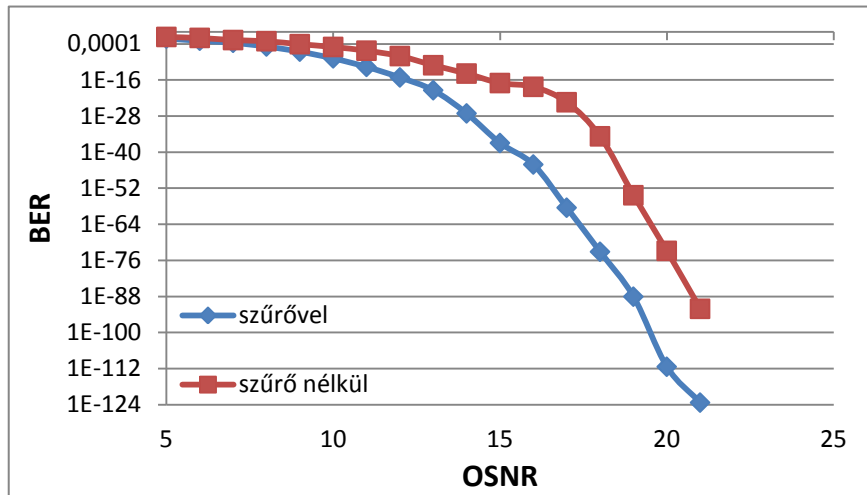
Az OSNR = 20 és 15dB-es értékekhez a kimeneti szemábrák a 4.32. ábrán láthatóak. A magas jelszint ingadozása tovább nőtt mindkét esetben, miközben a szemábra veszített nyitottságából. A 20dB-es jel-zaj viszonynál a jelváltások időben kezdenek egymástól elcsúszni, míg 15dB-es OSNR-nél más-más időben történik a 0-1 (1-0) átmenet. Az OSNR = 20dB esetén a  $Q = 19,2$ , míg a BER értéke még elhanyagolható. A másik esetben a  $Q = 9,4$ , a becült BER pedig  $9,2 \cdot 10^{-18}$ . A regenerátor ekkor már közel van a működési határához.



4.33. ábra. Regenerátor kimenetén a szemábra, ha a bemeneten az OSNR = 14dB.

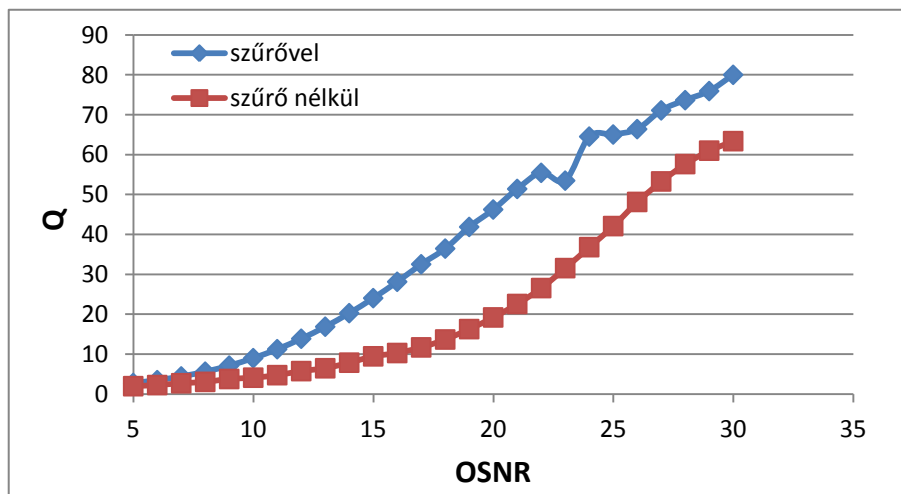
A bemeneti jel-zaj viszony 1dB-el való csökkentésével ezt a határt el is értem a szimulációban. A kimeneti szemábra a 4.33 ábrán látható. A szem nyitottsága tovább csökkent, míg a jelváltás élei között tovább nőtt az időbeli különbség. A mért  $Q = 7,9$ , ami az elfogadható jósági tényező alsó határán van. A becült BER értéke:  $1,3 \cdot 10^{-14}$ . A szűrő elhagyásával a regenerálható jel tartománya 4dB-el csökkent. Az egylépcsős elrendezéshez képest, azonban 8dB-el kisebb OSNR-rel rendelkező jel is regenerálható. A bemeneti szűrőt akkor érdemes elhelyezni a regenerátorban, ha kis OSNR-rel

rendelkező jelet kell erősítenünk, és nincs rá lehetőségünk, hogy a jelet nagyobb OSNR értéknél regeneráljuk.



4.34. ábra. A regenerátor kimenetén a BER változása a bemeneti OSNR függvényében, ha a regenerátor rendelkezik bemenetei szűrővel (kék), illetve szűrő nélküli (piros).

A BER görbe továbbra is erfc jellegű maradt, de a szűrős BER görbéhez képest eltolódott jobbra, ahogy a 4.34. ábrán látható. A regenerátoron belüli nagyobb zaj miatt, azonos bemeneti OSNR-hez nagyobb kimeneti BER fog tartozni. A két eset Q görbét a 4.35. ábra mutatja. A diagramon jól látszik, hogy a szűrőt tartalmazó regenerátor kisebb bemeneti OSNR-nél kezd el értékelhető regenerálást végezni. Az ábráról az is leolvasható, hogy sokkal jobb minőségű jelalakformált jelet tud előállítani a zajos jeleken, mint egy bemeneti szűrővel nem rendelkező regenerátor. A zajszint csökkenésével a két regenerátor Q tényezője között csökken a különbség.

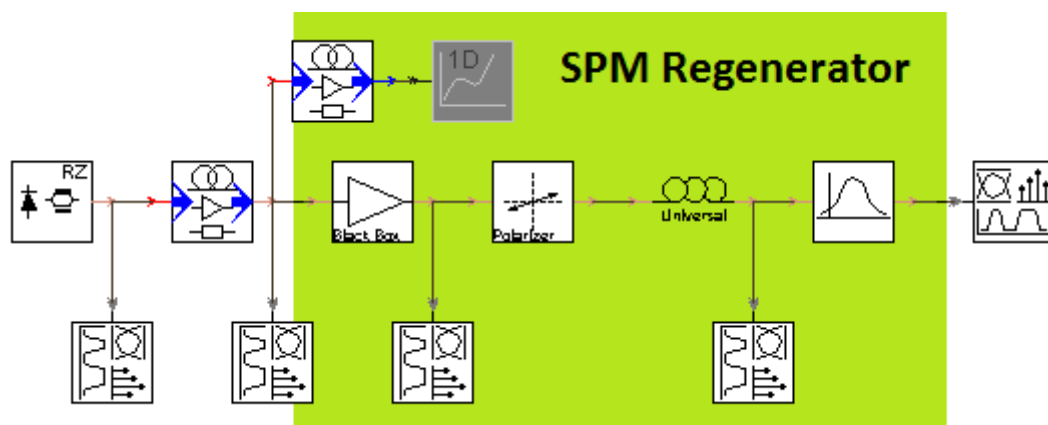


4.35. ábra. A regenerátor kimenetén a Q változása a bemeneti OSNR függvényében, ha a regenerátor rendelkezik bemenetei szűrővel (kék), illetve szűrő nélküli (piros).

## 5 SPM regenerátor

### 5.1 A szimulációs modell

A szimulációkhoz létrehozott SPM regenerátort az 5.1. ábra mutatja. Az ábra bal oldalán található a 40Gbps sebességű adó. Az adó RZ (Return to Zero) módon kódolta a PRBS generátor bitjeit. A PRBS generátor az adó blokkon belül helyezkedik el, csak úgy mint az RZ kódolást létrehozó kódoló. Az RZ impulzusok alakja Gauss jellegű és a félértékszélességük 6ps. Az előállított impulzus nagysága 5mW volt. A jelhez a zaj hozzáadása az XGM regenerátornál már bemutatott módon történik. Az adó utáni blokk a regenerátor bemeneti jelének OSNR-t állítja be. A blokk belső felépítése a 4.2. ábrán volt látható. A regenerátor bemenetére érkező jelet egy erősítővel felerősítem, hogy a jel szintje elég nagy legyen a nemlinearitás kialakulásához az üvegszálaban. Az erősítő karakterisztikája egy a VPI készítői által megmért valós erősítőével egyezett. A beállított erősítés nagysága 30dB volt. Az erősítő utáni polarizátor a szimuláció helyes lefutásához kell. A polarizátor csak az x tengellyel párhuzamos összetevőket engedte át, míg a rá merőlegeseket teljesen eltávolította jelből. Az SPM jelenség a szimulációban egy hagyományos üvegszálban alakult ki. Az üvegszál után el kell helyezni egy sáváteresztő szűrőt a 3.1. fejezetben említetteknek megfelelően. A szűrő kimenetére a jelvizsgálathoz szükséges analízátor csatlakozott.

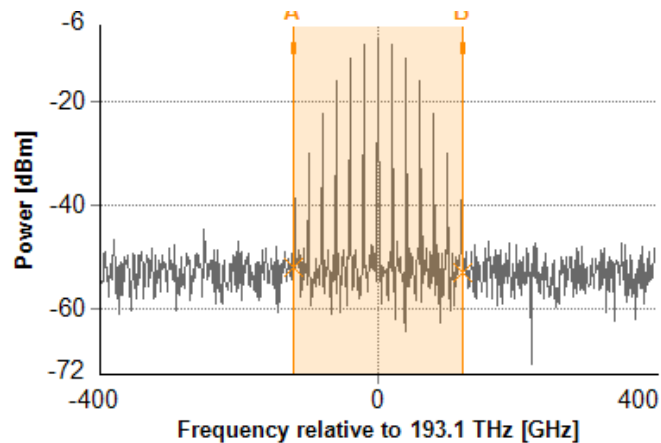


5.1. ábra. SPM elvű regenerátor kialakítása a VPI-ban.

### 5.2 Az SPM hatása a bemeneti jelre

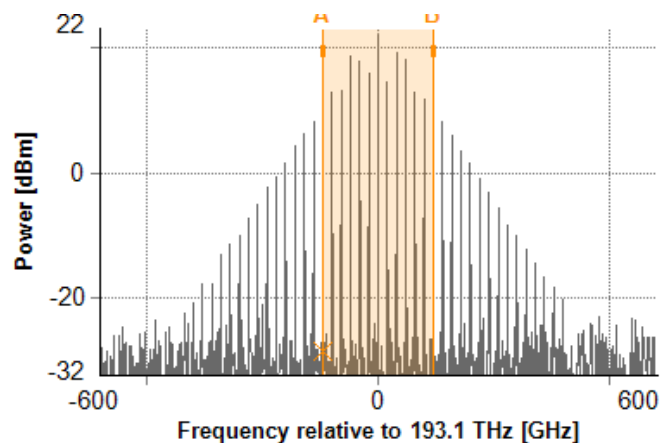
Az önfázis moduláció okozta jelkiszélesedés az 5.2. és 5.3. ábrákon figyelhető meg. A regenerátor bemenetére egy 25dB jel-zaj viszonyú jel került, aminek spektruma

az 5.2. ábrán látható. A regenerátor előtt a jel spektruma 243GHz szélességű. A jel sáv szélességén azt értem, ahol a jel komponensei még a zaj szintje fölött vannak.



5.2.ábra. SPM regenerátor bemenetén a jel spektruma.

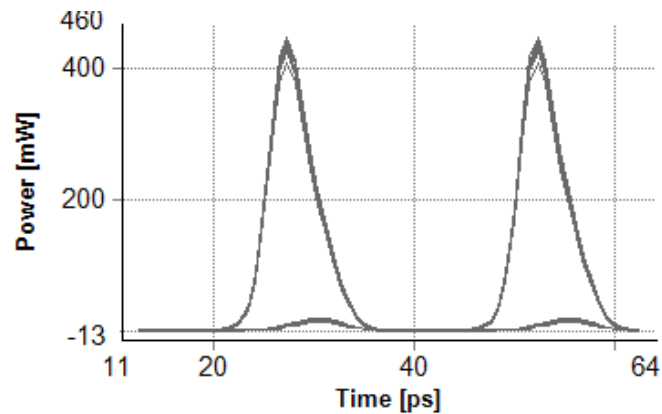
A felerősített bemeneti jel spektruma kiszélesedik az SPM hatására a nemlineáris üvegszálban, miközben a zaj spektruma változatlan marad. A kiszélesedés mértéke az 5.3. ábrán figyelhető meg. Az ábrán a két jelölő és az általuk közrefogott halványorsó rész az eredeti jel spektrumának a helyét mutatja. A regenerátor kimeneti szűrője előtt a jel spektruma 399GHz szélességű.



5.3. ábra. SPM következtében kiszélesedett jelspektrum.

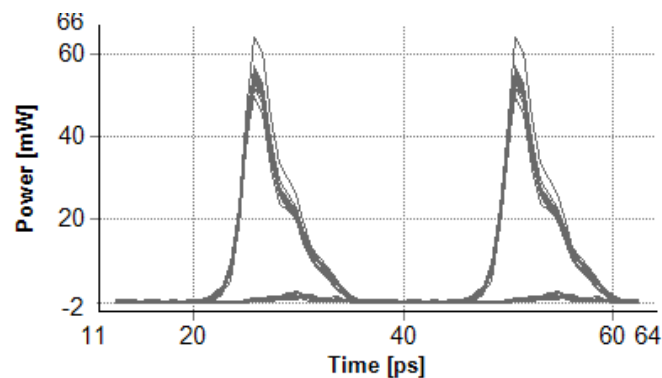
A jelkiszélesedést figyelembe véve határoztam meg a kimeneti szűrő középfrekvenciáját. A kimenetre egy másodrendű Butterworth szűrőt helyeztem el, melynek a sáv szélességét 100GHz állítottam. Ez 20GHz-el több, mint az adó jelének a szélessége a -3dB pontok között. A szűrő középponti frekvenciája nagyan meghatározza a regenerált jel minőségét. 192,95THz-es középfrekvenciánál a kimeneti jel szemábrája az 5.4. ábrán látható. Eredményül egy hibátlan nyitott szemábra adódott.

A magas szintek értékében 10-20mW ingadozás figyelhető meg. A jósági tényező értéke 49.



**5.4. ábra. SPM regenerátor kimeneti jelének a szemábrája, ha a szűrő középponti frekvenciája 192,95THz.**

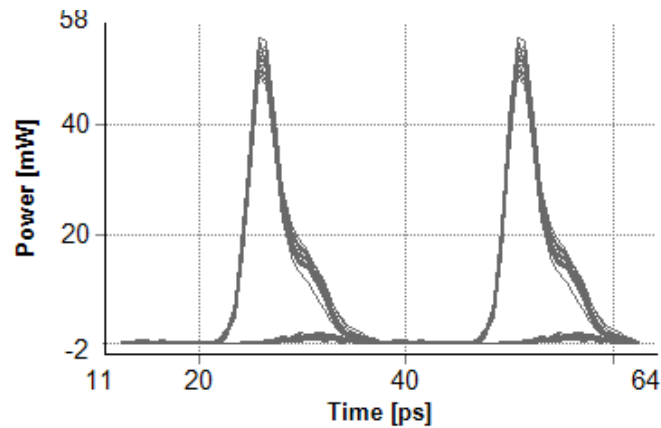
A szűrő középfrekvenciájának 192,85THz-re történő állításával kimeneti szemábrára az 5.5. ábrán látható módon alakul. Az előző ábrához képest csökkent a szem nagysága, hiszen a szűrő által most átengedett spektrumkomponensek energia tartalma kisebb, ahogy az az 5.3. ábrán látható volt. A jelszint az előzőhöz hasonló arányban ingadozik a magas jeleknél, viszont lefutó élek jelentősen veszítettek meredekségükből. A jel minőségének a romlása a Q értékében is jelentkezik, melynek értéke immáron „csak” 20.



**5.5. ábra. SPM regenerátor kimeneti jelének a szemábrája, ha a szűrő középponti frekvenciája 192,85THz.**

A jelregenerálás szempontjából nézve mindegy, hogy a kiszélesedett jel melyik oldalát engedi át a szűrő. Az 5.6. ábrán látható a kimeneti jel szemábrája, mikor a szűrő a jel másik oldalsávjának egy részét engedi át. A szűrő középponti frekvenciája 193,35THz volt, ami a spektrumban pont a szimmetrikus párja az 5.5. ábrához tartozó

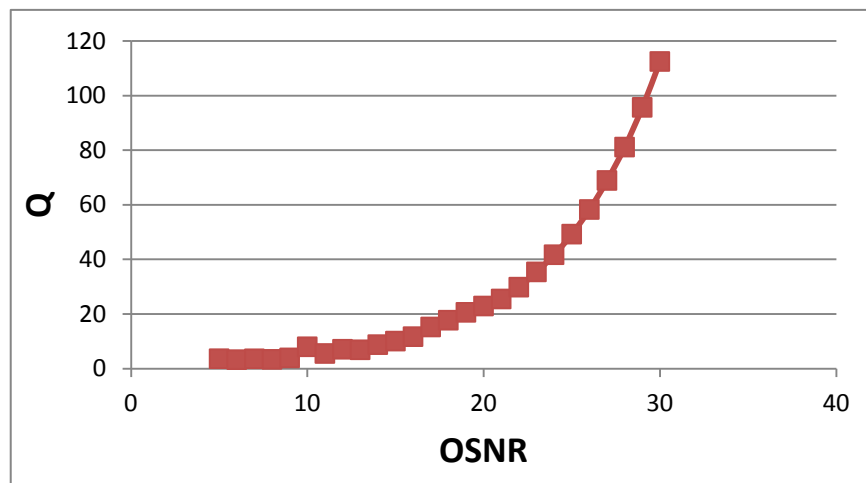
szűrőjének. A két szemábra között nincs jelentős eltérés, amit a lenti ábrához tartozó  $Q = 23$  értéke is alátámaszt. Ez alig több, mint az előző ábrához tartozó jósági tényező.



5.6. ábra. SPM regenerátor kimeneti jelének a szemábrája, ha a szűrő középponti frekvenciája 193,35THz.

### 5.3 Jel-zaj viszony hatása a regenerálásra

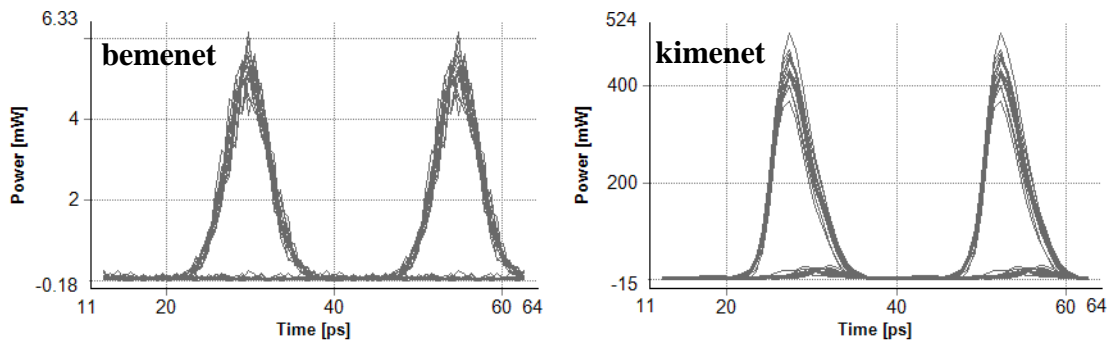
Az előző fejezet szimulációi alapján a kimeneti szűrő középponti frekvenciája 192,95THz-re állítottam, míg a sávszélessége továbbra is 100GHz volt. A regenerátor bemenetén a jel-zaj viszony 5-30dB között változott 1dB-es lépésekkel hasonlóan, mint az XGM regenerátor szimulációjánál. A szimuláció eredményét az 5.7. ábra mutatja.



5.7. ábra. A jósági tényező változása az OSNR függvényében, ha az SPM regenerátor kimenetén egy Butterworth szűrő található.

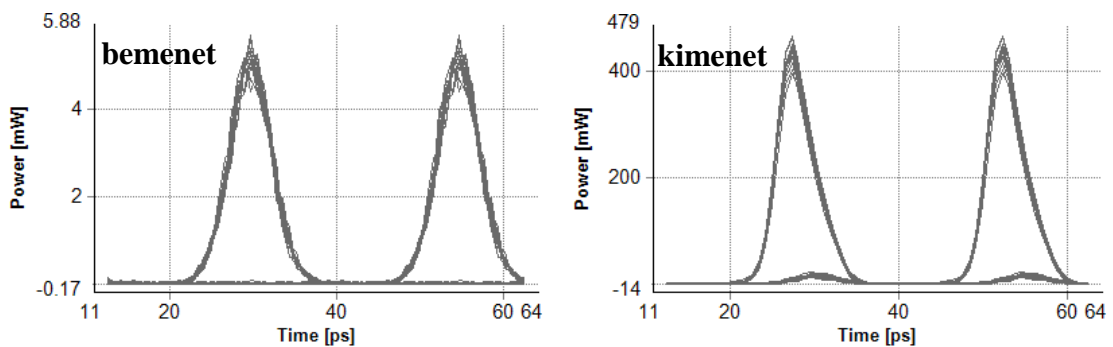
A jelregenerálás határa az ábra alapján az OSNR = 16dB-nél van, ahol a szimulált  $Q = 11,6$ . A regenerátor be- és kimeneti szemábrája az 5.8. ábrán látható. A kimeneti szemábra ugyan nyitott, de az RZ impulzusok nagyságában 100-150mW-os ingadozás van, ami jelentősen lerontja a jósági tényező értékét. A jelspektrum jelentős

részének kiszűrésének következtében a kimeneti szemábra lefutó élei veszítenek a meredekségükből a bemeneti állapothoz képest.



5.8. ábra. SPM regenerátor be- és kimeneti szemábrája OSNR = 16dB-nél.

A 20dB-es jel-zaj viszonyhoz tartozó be- és kimeneti szemábrát az 5.9. ábra mutatja. A jelentős spektrum szűrés miatt a kimeneti szemábra lefutó élei most is enyhébb meredekségűek a felfutó élekhez képest. A regenerátor zajscsökkentő hatása megfigyelhető az ábrán. A 0-1 (1-0) átmenet egy adott meredekséggel történik a kimeneti szemábrán, nincsenek benne éles meredekség változások, mint a bemeneti szemábra éleiben.



5.9. ábra. SPM regenerátor be- és kimeneti szemábrája OSNR=20dB-nél.

A 20dB-nél nagyobb jel-zaj viszonyhoz tartozó értékeknek a gyakorlatban nincsen jelentőségük, hiszen ekkora OSNR-rel rendelkező jeleknél nem alkalmazunk jelalakformálást. Így a hozzájuk tartozó szemábra bemutatásától eltekintek.



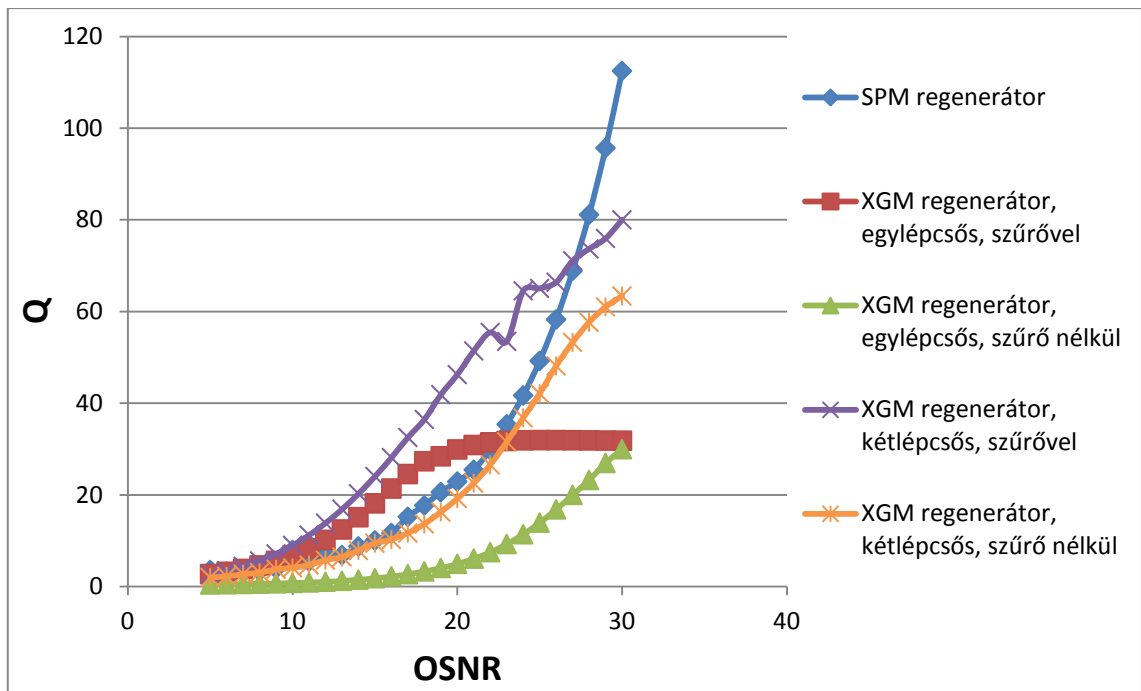
## 6 Az XGM és SPM regenerátor összehasonlítása

A két regenerátor felépítését már röviden összehasonlítottam a 3.1. táblázatban. A bemutatott regenerátor elrendezések alapján látható, hogy az SPM regenerátor egy nagyon egyszerű megoldás, hiszen mindössze három elem kell hozzá: egy erősítő, egy nemlineáris üvegszál, optikai szűrők. A regenerátor hátránya a jelalakformáláshoz szükséges nagy optikai jelszintek. Az XGM regenerátor jóval több elemből áll már egylépcsős esetben is. Ezen regenerátorok hátránya, hogy tartalmaznak lézer diódát, melynek kibocsájtott intenzitása nem csak a hőmérséklettel, hanem az idő múlásával is változik. Az XGM regenerátorok árát jelentősen növeli a lézer dióda, a SOA-k, valamint a 2-3 szűrő, szemben az SPM megoldás egyetlen szűrőjével. Az XGM regenerátorral viszont hullámhossz független regenerálás is megvalósítható, ami DWDM rendszerek esetén fontos és kizárja az SPM regenerátor alkalmazhatóságát.

<b>SPM</b>	<b>XGM</b>
3 elemből megvalósítható	sok elemből épül fel
olcsó	drága
A jel spektrumának csak kis része kerül felhasználásra.	lézer dióda
jel hullámhossza megváltozik	jel hullámhossza változatlan marad (kétlépcsős XGM)
elemek között nem kell szinkronizáció	kétlépcsős esetben a két ág jelét szinkronizálni kell egymáshoz

6.1. ábra. SPM és XGM regenerátor főbb megvalósítási különbségei.

A két elrendezés jelalakformáló képességét a jósági tényező segítségével lehet összehasonlítani. A szimulált jósági tényezők együtt a 6.1. ábrán szerepelnek. Az ábrázolt jósági tényezők görbéit 20-25dB-nél kisebb jel-zaj viszony mellett érdemes megfigyelni, hiszen ennél jobb OSNR-rel rendelkező jel nem fog a regenerátor bemenetére kerülni.



6.1. ábra. A szimulált regenerátorok kimeneti jósági tényezőinek a változása az OSNR függvényében.

A legrosszabb jelregenerálást a szűrő nélküli egylépcsős XGM regenerátor valósítja meg. Ennél jobb jelalakformálást végez az SPM regenerátor. Az eredményekből az is látszik, hogy szűrő nélküli egylépcsős XGM regenerátort nem érdemes alkalmazni, hiszen jóval bonyolultabb és drágább, mint egy SPM regenerátor. Ráadásul egylépcsős XGM regenerátornál nem csak a jel hullámhossza változik meg, hanem a jel inverze lesz a kimeneten, ami a jel vételét tovább bonyolítja. Az SPM regenerátorral azonos minőségű regenerálást végez egy szűrő nélküli kétlépcsős regenerátor. Ezt a regenerátor elrendezést DWDM rendszerekben érdemes használni, ahol nem engedhető meg a jel hullámhosszának a megváltozása. A többi helyen az SPM regenerátor jóval költséghatékonyabban végzi el a jelalakformálást az XGM elvű megoldáshoz képest. A második legjobb jelregenerálást a szűrőt tartalmazó egylépcsős XGM regenerátor végzi. A hullámhosszkonvertált és invertált kimeneti jel azonban jelentősen hátráltatja ezen regenerátor alkalmazását a hálózatokban, hiába van jelentős eltérés a jelalakformált jel minőségében az SPM regenerátoréhoz képest. A szűrővel rendelkező kétlépcsős XGM regenerátor valósítja meg a legjobb minőségben a jelalakformálást, ugyanakkor ez a megoldás is legdrágább a benne lévő sok optikai elem miatt. Ezt a regenerátort mindenhol lehet alkalmazni (DWDM rendszerekben is) a hullámhossz konverzió nélküli regenerálás miatt. Az SPM és a szűrővel rendelkező XGM regenerátor Q tényezője között jelentős az eltérés, ami megfontolásra készíti a

regenerátor alkalmazásán gondolkodókat. Mindent figyelembe véve a mérleg nyelve kissé a szűrővel rendelkező kétlépcsős regenerátor felé billen a szélesebb körben való alkalmazhatósága és a jobb Q tényező miatt.

A 6.1. ábrán ugyan nincs ábrázolva, de kétlépcsős XGM regenerátor esetén is bekövetkezik a Q tényező értékében a telítődés. SPM regenerátor esetén ilyen jelenség nem lép fel. Egylépcsős XGM regenerátornál  $OSNR = 20\text{dB}$ , míg kétlépcsős XGM regenerátornál  $OSNR = 45\text{dB}$ -nél lép fel, ami a regenerálás szempontjából elhanyagolható korlátozó tényező. Hiszen  $20\text{dB}$ -nél jobb jel-zaj viszonyal rendelkező jel nem kerül egy regenerátor bemenetére.

## Összefoglalás

A TDK dolgozatomban bemutattam a lehetséges 2R alapú optikai erősítőket és a regeneráláshoz alkalmazott nemlineáris jelenségeket. A lehetséges regenerátorok közül az SPM és XGM elven működő megoldások vizsgálatát végeztem el. Az XGM regenerátornál látható volt, hogy megvalósítható egylépcsős és kétlépcsős elrendezésben. Egylépcsős esetben a bemeneti jel inverze jelenik meg a kimeneten a regenerátor CW lézerének hullámhosszán. A dolgozatomban bemutattam, hogy egylépcsős XGM regenerátor bemenetéről nem érdemes elhagyni a szűrőt, mert ekkor még egy SPM regenerátor is jobb jelalakformálást végez. A kétlépcsős XGM regenerátor kiküszöböli az egylépcsős elrendezés hátrányait, és a regenerált jel jósági tényezője közel duplája az egylépcsős megoldásnak. Az XGM regenerátoroknál bemutattam a nemlineáris jelenség hatására, hogyan alakul ki az invertált jel. Azt is megmutattam a regenerátoron belüli hullámhossz konverziót lefelé célszerű elvégezni a jobb jelalakformáláshoz.

Az SPM regenerátornál szintén megmutattam a nemlineáris jelenség, hogyan szélesíti ki a jel spektrumát és a kimeneti jel mennyire függ a szűrő középponti frekvenciájától. A regenerátorok összehasonlításánál látható volt, hogy egy SPM regenerátor által létrehozott jelalakformálás megegyezik egy szűrő nélküli kétlépcsős regenerátoréval. Ennek ellenére az elterjedését nagyban akadályozza a regenerálás során bekövetkező hullámhossz eltolódás.

A két regenerátor elrendezés közül az XGM elvű megoldásnak van nagyobb esélye, hogy a piacra kerüljön, hiszen mindenhol alkalmazható és a jelalakformálást is széles OSNR tartományban képes elvégezni.

## Irodalomjegyzék

- [1] Govind P. Agrawal, "Nonlinear Fiber Optics Third Edition," Academic Press, ISBN: 0-12-045143-36
- [2] Mário F. S. Ferreira, "Nonlinear effects in optical fibers," John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey 2011
- [3] Huangping Yan, Yuanqing Huang, Zihua Weng, Yiju Wang, Ruifang Ye, Zhaoxi Wu, Jin Wan, "All-optical Wavelength Converter Based on Self-Phase Modulation in Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber," SPIE Vol. 6837, 2007
- [4] P.V. Mamyshev, "All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect," ECOC'98
- [5] Martin Rochette, Libin Fu, Vahid Ta'eed, David J. Moss, Benjamin J. Eggleton, "2R Optical Regeneration: An All-Optical Solution for BER Improvement," IEEE, 2006
- [6] Mazroa Dániel, "Félvezető optikai erősítőkkal megvalósított optikai regenerátorok szimiációja és mérése," TDK dolgozat, BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar, 2008
- [7] Dr. Alistair Poustie, "Semiconductor Optical Amplifiers Light Up All-Optical Signal Processing," Photonics Spectra, 2007
- [8] Reza Salem, Mark A. Foster, Amy C. Turner, David F. Geraghty, Michal Lipson, and Alexander L. Gaeta, "Signal regeneration using low-power four-wave mixing on silicon chip," Nature Photonics, VOL. 2, 2008
- [9] G. Contestabile, R. Proietti, N. Calabretta, "Reshaping Capability of Cross-Gain Compression in Semiconductor Amplifiers," IEEE Photonics Technology Letters, VOL. 17, No. 12
- [10] Giampiero Contestabile, Roberto Proietti, Nicola Calabretta, and Ernesto Ciaramella, "Cross-Gain Compression in Semiconductor Optical Amplifiers," Journal of Lightwave Technology, VOL. 25, No. 3
- [11] Terji Durhuus, Benny Mikkelsen, Carsten Joergensen, Soeren Lykke Danielsen, and Kristian E. Stubkjaer, "All-Optical Wavelength Conversion by Semiconductor Optical Amplifiers," Journal of Lightwave Technology, VOL. 14, No. 6

- [12] Giampiero Contestabile, "All-Optical Signal Regeneration using SOAs," IEEE Communications and Photonics Conference and Exhibition (ACP), 2010 Asia
- [13] VPIPhotonics, "VPIcomponentMaker™ Potonics Circuit User's Manual," ver.8.7, 2011.November, pp 85-165
- [14] VPIPhotonics, VPItransmissionMaker optikai hálózat szimulátor