

# ПРИМЕРИ ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ОПТИЧНИ ВЛАКНА ПОДХОДЯЩИ ЗА СТАНДАРТА G.657

проф. д-р Ангел Тошков, БСУ Бургас  
[angel@bfu.bg](mailto:angel@bfu.bg), Tel. 056 900591

## DESIGN OF OPTICAL FIBRES SUITABLE FOR STANDARD G.657

**Abstract:** The article provides some complex graphics in which are linked some of important input parameters of optical fibers based on silicon and the macro-bending losses. Such a model is extremely useful both in studying and understanding of optical fibers, and in making specific decisions in analysis and design or evaluation of their parameters. For this purpose, are presented requirements regarding the parameters of optical fiber as defined in G.657 standard. This standard defines the fiber with minimal loss of macro-bending. The article discussed some models where a profile of the core is designed using modified alpha-peak function. The article examined several types of optical fibers and the relationship between input parameters and the macro bending losses. Presented are tables and charts, and some conclusions are made.

**Keywords:** Optical fibers, macro bending losses, G.657, projecting, оптични влакна, загуби от макроогъвания, стандарт G.657

### I. ВЪВЕДЕНИЕ

Оптични влакна по стандарт G.657.

Тази препоръка се занимава с характеристиките и загубите от огъване на едномодови оптични влакна и кабели за достъп до мрежата. Тя се разработва на базата на препоръка G.652 но с подобрени загуби от микро и макро огъвания. Това става чрез въвеждането на две категории едномодови оптични влакна, едното от които е категория А. Те са пълно съответствие с ITU-T G.652 едномодови оптични влакна и могат да бъдат използвани в други части на мрежи. Категория В не е в съответствие с ITU-T G.652 но е със ниски стойности на загуби от макро огъвания при много малки радиуси на огъване и се препоръчва използването им в сгради. Категория А са подходящи за използване в спектралната лента от 1260 до 1625 nm. Влакната от подкатегория А1 са подходящи за използване в мрежи при които се налага малък радиус на огъване на влакната - до 10мм. Влакната от подкатегория А2 са подходящи за използване при мрежи, при които огъванията са с радиус до 7,5мм.

Влакната в категория В1 са подходящи за пренос в регионите около 1310, 1550 и 1625 nm за ограничени разстояния. Тези влакна могат да се свързват добре с всички влакна по ITU-T G.652, посочвайки много ниски стойности на радиуса на огъване до около 10 mm. Подкатегория В2 са подходящи при радиус на огъване до 7,5мм, тази подкатегория обхваща напълно бившата ITU-T G.657 В (12/2006). Влакната от подкатегория В3 са подходящи за проектиране на влакна допускащи радиус на огъване до 5мм. Загубите от макро огъвания в оптичните влакна зависят от дължината на вълната и локалния радиус на огъване на влакното. Загубите от макро огъвания в окабелени влакна могат да се различават от тези в неокабелени влакна заради огъващо-ограничаващия ефект на кабелната структура на огъваното влакно. Радиусът на огъване на всяко влакно след инсталиране на кабела трябва да бъде достатъчно голямо за да ограничи загубите от макро огъвания. По-принцип загубите от макро огъвания зависят от избора на стойности за други параметри на влакната като диаметър на ядрото,

диаметър на модовото поле, коефициента на хроматична дисперсия, граничната дължина на вълната и др. Оптимизация по отношение на загубите от макро огъвания обикновено представлява компромис при избора на стойности на тези параметри.

Съгласно изискванията на спецификацията G.657 категория А, коефициентът на хроматична дисперсия, измерените групови закъснения или коефициент на хроматична дисперсия като функция на дължината на вълната могат да се пресмятат както са определени в приложения ITU-T G.650.1. Уравнението на Селмайер може да се използва за проверка във всеки диапазон 1310 nm и 1550 nm. Уравненията са точни за 1310nm, но за 1550nm не са достатъчно точни, за това, трябва да се използват само за двукомпонентни стъкла. При влакната от категория В хроматичната дисперсия не е от решаващо и поради това нейната стойност не е включена в характеристиките на стандарта.

Препоръчва се поляризационната дисперсия да се изчислява на базата на статистическа оценка. Измерванията и стойностите на неокабелени оптични влакна са необходими, но не са достатъчни за да се определят стойностите на окабелените влакна. Промяната на стойностите на поляризационната дисперсия за неокабелени и окабелени влакна зависи

от конструкцията на кабела и начинът на производство.

Максималните стойности на коефициента на поляризационна дисперсия може да се разглеждат като почти еквивалентни на максималните стойности на статистическата вариация на диференциалното групово закъснение, което варира на случаен принцип като функция на времето и дължината на вълната. В този смисъл, при налагане на изисквания към коефициента на поляризационна дисперсия за оптичните влакна, обикновено при подкатегория А, могат да бъдат определени ограничения на вариацията на диференциалното групово закъснение, което води до ограничаване и на поляризационната дисперсия. За влакна от категория В коефициентът на поляризационна дисперсия като цяло не е от голяма важност и затова не е включен в таблицата дадена по стандарта.

Следващите таблици обобщават препоръчителните стойности на подкатегории на влакна в категории А и В, които отговарят на целите на настоящата препоръка. Таблица 1, категория А съдържа препоръчителните параметри и стойности по отношение на загуби от макро огъвания. Тази категория има две подкатегории с различни изисквания за макро огъвания ITU-T G.657.A1 и ITU-T G.657.A2 влакна.

Таблица 1. ITU-T G.657 категория А

Параметри на влакното					
Параметър	Детайли	Стойност			
Диаметър на модово поле	Дължина на вълната	1310 nm			
	Номинални стойности	8,6-9,5 μm			
	Толеранс	±0.4 μm			
Диаметър на обвивката	Номинални стойности	125 μm			
	Толеранс	±0.7 μm			
Отклонение от цилиндричност на обвивката	Максимум	1.00%			
Дължина на вълната на среза	Максимум	1260 nm			
Не окабелено влакно. Загуби от макро огъвания		ITU-T G.657.A1		ITU-T G.657.A2	
	Радиус на огъване(mm)	15	10	15	10, 7,5

	Брой на огъвания	10	1	10	1	1
	Максимум в 1550 nm (dB)	0,25	0,75	0,03	0,1	0,5
	Максимум в 1625 nm (dB)	1,0	1,5	0,1	0,2	1,0
Коефициент на хроматична дисперсия:	$\lambda_{0min}$	1300 nm				
	$\lambda_{0max}$	1324 nm				
	$S_{0max}$	0.092 ps/nm <sup>2</sup> × km				
Коефициент на затихване	Максимум за 1310 до 1625 nm	0.4 dB/km				
	Максимум за 1383 nm ±3 nm	0.4 dB/km				
	Максимум за 1550 nm	0.3 dB/km				
PMD Коефициент	Максимум PMDQ	0.20 ps/√km				

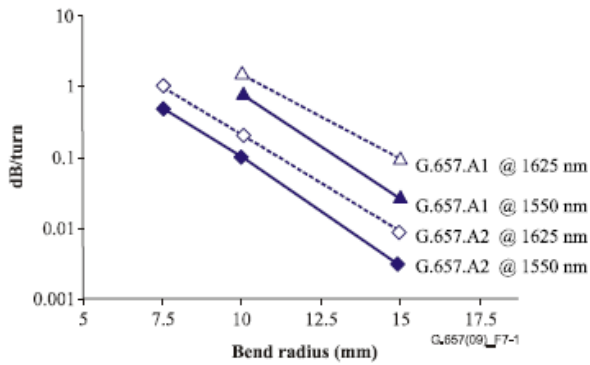
Таблица 2, за категория В, съдържа препоръчителни стойности и стойности на влакната в мрежи, в които се допускат много малки радиуси на огъване. Прилага се за ограничени разстояния на пренос. За диаметър на междумодово поле и коефициенти на хроматична дисперсия се препоръчва диапазон от стойности. Те могат да бъдат извън диапазона от стойности препоръчани в ITU-T G.652. Тази категория има две подкатегории с различни изисквания за макро огъвания ITU-T G.657.B2 и ITU-T G.657.B3 влакна.

Таблица 2. ITU-T G.657 категория В

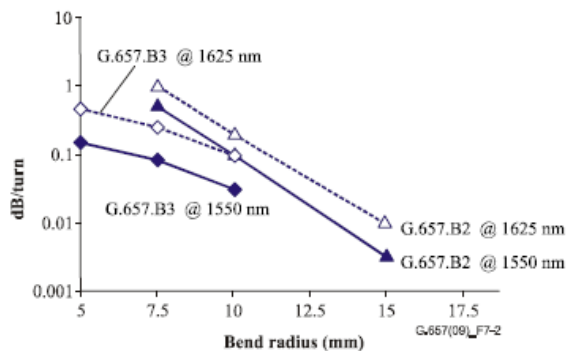
Параметри на влакното							
Параметър	Детайли	Стойност					
Диаметър на модово поле	Дължина на вълната	1310 nm					
	Номинални стойности	6.3-9.5 μm					
	Толеранс	±0.4 μm					
Диаметър на обвивката	Номинални стойности	125 μm					
	Толеранс	±0.7 μm					
Отклонение от цилиндричност на обвивката	Максимум	1.00%					
Дължина на вълната на среза	Максимум	1260 nm					
Не окабелено влакно. Загуби от макро огъвания		ITU-T G.657.B2			ITU-T G.657.B3		
	Радиус на огъване(mm)	15	10	7,5	10	7,5	5
	Брой на огъвания	10	1	1	1	1	1
	Максимум в 1550 nm (dB)	0,03	0,1	0,5	0,03	0,08	0,15
	Максимум в 1625 nm (dB)	1,0	0,2	0,1	0,1	0,25	0,45
Стрес профил	Минимум	0.69 GPa					
Коефициент на хроматична дисперсия:		TBD					
Коефициент на затихване	Максимум за 1310 nm	0.5 dB/km					
	Максимум за 1550 nm	0.3 dB/km					
	Максимум за 1625 nm	0.4 dB/km					
PMD Коефициент		TBD					

Стойностите на загубите от макро огъвания при различните подкатегории

определени в настоящата препоръка са представени на фигури 1 и 2.



Фигура 1. Загуби от макро огъвания на таблица 1 категория А.

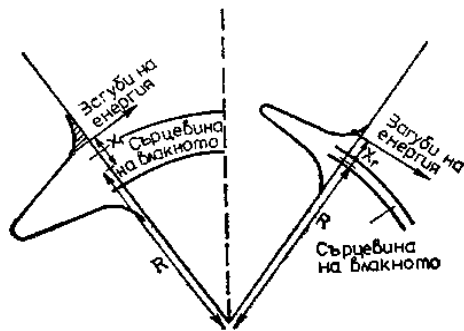


Фигура 2. Загуби от макро огъвания на таблица 2 категория В.

## II. МЕТОД ЗА ПРЕСМЯТАНЕ НА ЗАГУБИТЕ ОТ МАКРООГЪВАНИЯ

$\alpha_{macro}$

Всички диелектрични вълноводи,



Фигура 3 . Загуби на енергия поради

които не са абсолютно прави излъчват енергия. Фиг.3 пояснява причината за възникване на загубите.Тя илюстрира ефекта от огъванията върху основната мода във влакното с малка стойност на  $V$  при два различни диаметри на сърцевината.Тъй като огъването е плавно, влиянието му върху напречното поле е пренебрежимо.Коефициентът на затихване в следствие излъчването на енергия има вида:

$$\alpha_r = C_1^{(-C_2 R)}$$

където  $C_1$  и  $C_2$  са константи, които зависят от  $R$ . От експоненциалната зависимост на  $\alpha_r$  от  $R$ , която се обяснява със стръмното затихване на полето във вътрешността на обвивката, следва, че при някакъв радиус намаляването на  $R$  два пъти може да промени загубите от пренебрежимо малки до недопустимо големи.

### Пресмятане на загубите от макро огъвания

Загуби от макро огъвания има тогава, когато влакно е огънато с радиус по-голям в сравнение с диаметъра на влакното. Те се определят както обикновено с  $P(z)=P(0).e^{(-\gamma z)}$ , където  $\gamma$  са загубите от макроогъвания в децибели,  $P(0)$  е вкараната във влакното мощност, а  $P(z)$  е изходната мощност, съответно на разстояние  $z$ . Има два модела на загуби от макро огъвания

Първият модел е подходящ за изчисляване на загубите от макро огъвания за всеки режим LP, за основните и тези от по-висок порядък моди, при произволен профил на коефициента на пречупване на оптичните влакна. Използвайки тази формула коефициента  $\gamma$  на загубите от макро огъвания се изразява като функция на мощности, и на радиуса на огъване  $R_b$  в следния вид:

$$\gamma = \frac{\sqrt{\pi} \left( \frac{P_{clad}}{P} \right) \exp\left( \frac{-4\Delta W^3}{3r_c V^2} R_b \right)}{2sr_c [K_{v-1}(W)K_{v+1}(W) - K_v^2(W)] W \left( \frac{WR_b}{r_c} + \frac{V^2}{2\Delta W} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

Параметрите, включени по-горе са:

$$V = k_0 r_c \sqrt{n_{max}^2 - n_{min}^2} - \text{нормирана}$$

характеристична честота (бездименсионна стойност)

$$W = r_c \sqrt{\beta^2 - (k_0 n_{min})^2} - \text{лента на}$$

$$\Delta = \frac{(n_{max}^2 - n_{min}^2)}{2n_{max}^2} - \text{нормираната}$$

разлика в коефициентите на пречупване (бездименсионна стойност)

-  $r_c$  - радиус на ядрото на влакното,

- $n_{max}$  и  $n_{min}$  са максималните и минималните стойности на индекса на пречупване,
- $\beta$  е константа на разпространение при конкретния режим,
- $k_0$  е константа във вакуум,
- $\nu$  е азимуталния номер на модата,
- $S = 2$ , ако  $\nu = 0$  или  $S = 1$  за  $\nu \neq 0$
- $K_\nu$  е промяна на функцията на Бесел
  - $P_{clad}$  е мощността разпространяваща се в обвивката
- $P$  е мощността разпространяваща се в ядрото на влакното
- $R_b$  е радиуса на огъване на влакното

Използване на втория модел за пресмятане на коефициента  $\gamma$  за загуби от макроогъвания.

$$\gamma = \left( \frac{\pi V^8}{16 r_c R_b W^3} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left( - \frac{4 R_b \Delta W^3}{3 r_c V^2} \right) \frac{\left[ \int_0^\infty (1-f) F_0 R dR \right]^2}{\int_0^\infty F_0^2 R dR}$$

където  $F_0$  е диаметър на радиалното модово поле на основната мода  $LP_{01}$  или  $F_0 = 2w_0$ .

Радиусът на модовото поле  $w_0$  при постоянен радиус на сърцевината  $a$  е функция само на  $V$  параметъра, който от своя страна зависи от  $NA$  и  $\lambda$ . Изведена е проста апроксимация за едномодово влакно със стъпално-радиален профил, която в обхвата за  $V$  параметъра  $1,6 < V < 2,6$  описва зависимостта на  $w_0$  от радиуса на сърцевината  $a$  и  $V$  параметъра:

$$2w_0 \approx \frac{2.6}{V} a \frac{\lambda}{\lambda_c}$$

$$f = \frac{n(r)^2 - n_{min}^2}{n_{max}^2 - n_{min}^2}$$

$n(r)$  е коефициентът на пречупване от профила на влакното в точка на разстояние  $r$  от центъра на ядрото.

$r$  – е разстоянието от центъра на ядрото до точката в която правим изчислението.

Двата модела дават подобни резултати за влакна със стъпално-радиален профил на коефициента на пречупване.

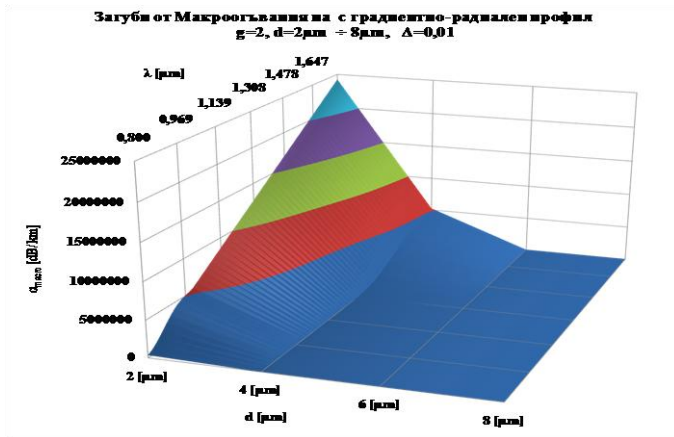
Коефициентът на загубите  $\gamma$  може да бъдат конвертирани до загуби в децибели на километър, както следва:

$$\alpha_{macro} = \frac{10}{L} \log \frac{P_{in}}{P_{out}} = \frac{10}{L} \log [\exp(\gamma L)] = \frac{10}{\ln 10} \gamma$$

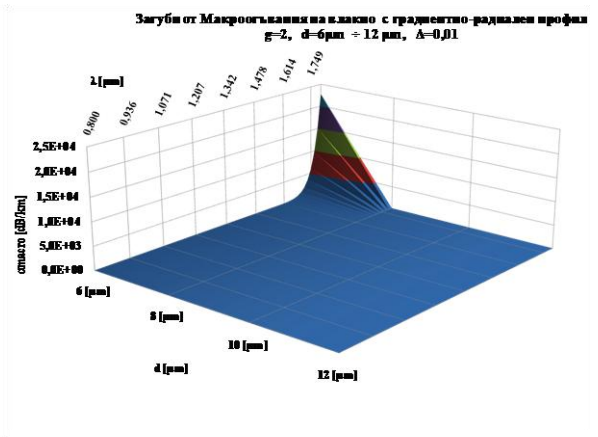
Използвайки някой от тези два модела, както и известните методи за изчисляване на необходимите за тази модели параметри, можем да създадем алгоритъм, при който да пресмятаме загубите от макроогъвания. Моделът може да бъде реализиран на MatLab, MathCad или друг инструмент за математически и инженерни пресмятания и да бъде използван за оптимизационен анализ на връзките между конструктивните параметри на влакното, материалите от които е изградено и технологията на производство и стойностите на загубите от микро и макроогъвания.

В конкретния случай за анализа е използван софтуерен продукт в които е вграден компилиран модул на модела разработен на MatLab. На фиг. от 4 до 11 са представени няколко варианта на графики, показващи връзките между някои основни конструктивни параметри като  $g$ ,  $A$ ,  $d$ ,  $\lambda$  и стойностите на загубите от макроогъвания  $\alpha_{macro}$ . Графиките са получени на база на предложените по-горе изчислителни формули. Те показват само малка част от възможните комбинации, при които е възможно да бъдат произведени оптични влакна. Въпреки това, ясно са изразени тенденциите на промяна на загубите от макроогъвания, като функция на посочените параметри на оптичните влакна. Графиките ни дават визуална представа за това, в какви граници трябва да се избират съответните стойности за да могат влакната да отговарят на G.657.

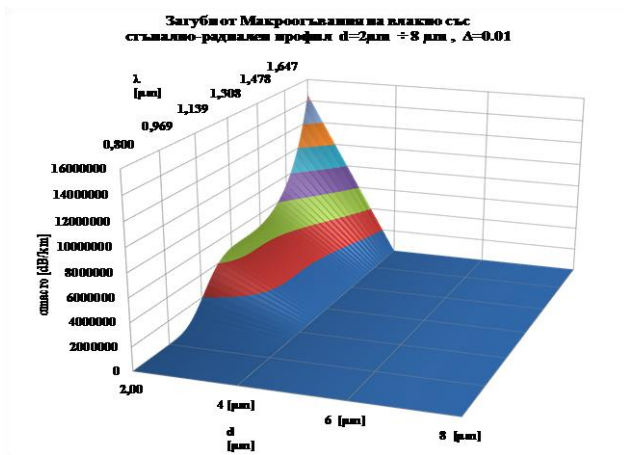
При необходимост от по-прецизни изчисления оптимизационния процес може да се управлява, чрез избирането на подходящи стъпки на промяна на управляваните параметри и избор на оптимална комбинация.



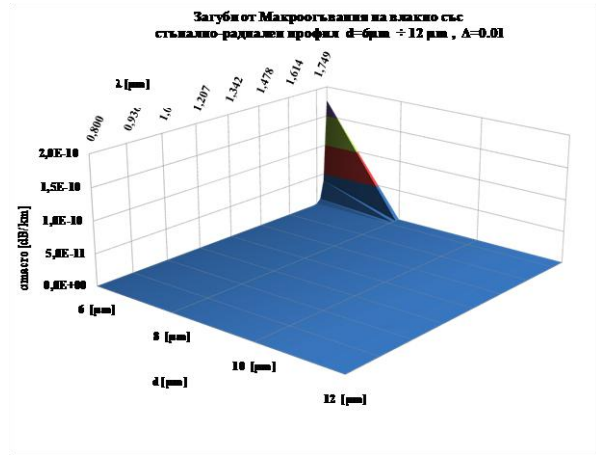
Фигура 4.  $d=2\div 8\mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.01$ , GRP,  $g=2$



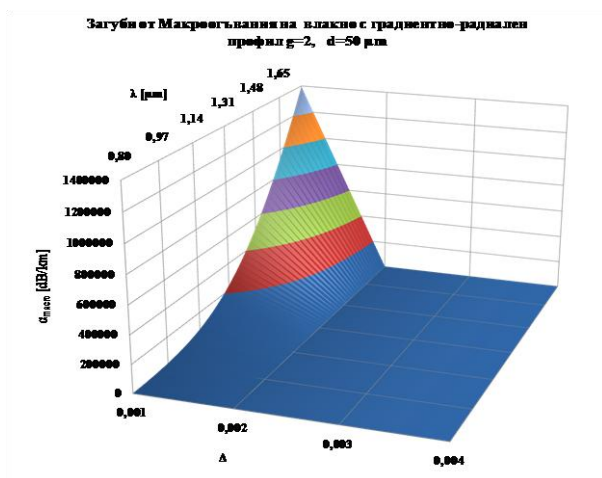
Фигура 5.  $d=6\div 12\mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.01$ , GRP,  $g=2$



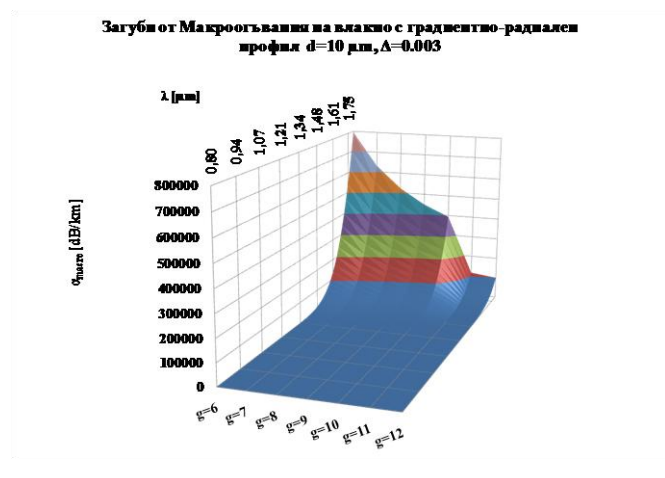
Фигура 6.  $d=2\div 8\mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.01$ , SRP,  $g=2$



Фигура 7.  $d=6\div 12\mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.01$ , SRP,  $g=2$

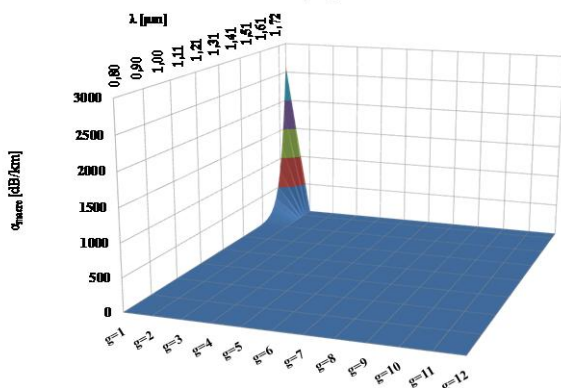


Фигура 8.  $d=50\mu\text{m}$ ;  $g=2$ , GRP



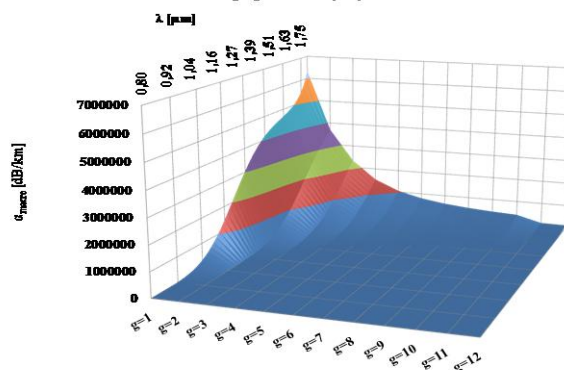
Фигура 9.  $d=10\mu\text{m}$ ;  $\Delta=0.003$ , GRP

Загуби от Макроогъвания на влакно с градиентно-радиален профил  
 $d=10\mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.008$



Фигура 10.  $d=10\mu\text{m}$ ;  $\Delta=0.008$ , GRP,  $g=1\div 12$

Загуби от Макроогъвания на влакно с градиентно-радиален профил  
 $d=10\mu\text{m}$ ,  $\Delta=0.003$



Фигура 11.  $d=10\mu\text{m}$ ;  $\Delta=0.003$ , GRP,  $g=1\div 12$

На фиг. 4 до 11 са представени загубите от макроогъвания при базови параметри на някои опорни за изчисленията оптични влакна.

Характерно за отбелязване тук е, при намаляване на  $\Delta$  под 0.01, при  $g$  около и под 2 и при увеличаване на дължината на вълната над 1400nm загубите нарастват значително и имат стойности достигащи до  $10^6$  и нагоре dB/km при диаметри на ядрата под  $6\mu\text{m}$ .

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ:

1. Загубите от макроогъвания проявяват силно изразен характер при нарастване на дължината на вълната. Това се отнася особено до влакната с профил близък до градиентния и за дължини на вълните в оптичен прозорец II и III.

2. При оптични влакна с голям диаметър  $d > 20\mu\text{m}$ , тези загуби нямат практическа стойност (освен при много малки стойности на  $\Delta < 0.003$  в комбинация с  $g < 1.5$ ).

3. Този тип загуби нарастват значително при намаляване на диаметъра на ядрото – обикновено под  $6\mu\text{m}$ .

4. Същото се отнася и за намаляването на  $\Delta$  под 0,005, както и за намаляването на  $g$  под 2.

Необходим е много внимателен подбор на управляващите параметри  $n$ ,  $d$ ,  $\Delta$  и  $g$ , особено при конструиране на влакна с дължини на вълната в оптичен прозорец III, за да се постигнат минимални загуби от макроогъвания.

Чрез подходящ подбор на параметрите е възможно да бъдат удовлетворени напълно

изискванията на спецификация G.657. Особено при този начин на проектиране е, че променяйки конструктивните параметри на влакната ние променяме не само загубите от макроогъвания но и стойностите на хроматичната и поляризационната дисперсия, на диаметъра на модовото поле, на честотната лента и на другите експлоатационни параметри на влакното. В този смисъл, самостоятелното проектиране на влакно с оптимални по отношение на G.657 параметри може да бъде постигнато като при всеки вариант се изчисляват и тоталната дисперсия и другите параметри на влакното. В конкретната статия са показани само тенденциите, показващи връзките между входните параметри на влакното и загубите от макроогъвания, без да се държи сметка за останалите работни параметри на влакното.

### LITERATURE:

[1]. Тошков А, Анализ на връзките между конструктивните и експлоатационните параметри на оптичните влакна, Варна, 2011.  
 [2]. Тошков А., „Нелинейни ефекти в оптичните влакна и тяхното влияние върху параметрите на предаване”, БСУ, Международна научна конференция „Взаимодействието теория-практика: ключови проблеми и решения”, Бургас, БСУ, 2011, БСУ, 2011

### Contacts:

Burgas, BFU, e-mail: [angel@bfu.bg](mailto:angel@bfu.bg), +35956900591.