

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

магістр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Метод оцінювання впливу екзогенних факторів для підвищення
ефективності оптоволоконних ліній зв'язку

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи РАМ-62
спеціальності _____

172 Електронні комунікації та радіотехніка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис) Шмир В.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник _____
(підпис) Дедів І.Ю.
(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____
(підпис) Хвостівська Л.В.
(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____
(підпис) Дунець В.Л.
(прізвище та ініціали)

Рецензент _____
(підпис) Тимків П.О.
(прізвище та ініціали)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)

[illegible]

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Метод оцінювання впливу екзогенних факторів для підвищення ефективності оптоволоконних ліній зв'язку // Кваліфікаційна робота магістра // Шмир Володимир Васильович // ТНТУ ім. І.Пулюя, ФПТ // Тернопіль, 2024 // с. - 91, рис. - 29, дод. - 1, бібл. - 41.

Ключові слова: ОПТОВОЛОКНО, ЗАГАСАННЯ, ДИСПЕРСІЯ.

В роботі запропоновано метод оцінювання впливу екзогенних факторів на оптоволоконні канали ліній зв'язку. Проведено аналіз оптоволоконних технологій, зокрема типів та методів виготовлення оптичних волокон, способів організації оптоволоконного зв'язку, обладнання, що при цьому засосовується. Проаналізовано фактори загасання сигналу в оптоволокну, зокрема механічні фактори, електромагнітні впливи, температурні впливи, вплив води, радіації, електротермічна деградація. Також проаналізовано фактори, що впливають на поляризаційно-модову дисперсію. Проведено функціональний аналіз механічних впливів на передавальні параметри оптичного волокна, зокрема мікровигинань та макровигинань, відносного видовження кабеля. Запропоновано метод оцінювання впливу вигинів на передавальні параметри оптоволоконна, зокрема для визначення степені впливу кількості витків на величину втрат, а також вплив радіусу згину.

ANNOTATION

Method for assessing the impact of exogenous factors to improve the efficiency of fiber optic communication lines // Shmyr V.V. // TNTU, FPT // Ternopil, 2024 // p. - 91, fig. - 29, appl. - 1, bibl. - 41.

Key words: OPTICAL FIBER, FAULTING, DISPERSION.

The paper proposes a method for assessing the impact of exogenous factors to improve the efficiency of fiber optic communication lines. An analysis of fiber optic technologies has been conducted, in particular, types and methods of manufacturing optical fibers, methods of organizing fiber optic communication, and equipment that is absorbed in this process. The factors of signal attenuation in the fiber optic have been analyzed, in particular, mechanical factors, electromagnetic effects, temperature effects, the effect of water, radiation, and electrothermal degradation. Factors affecting polarization-mode dispersion have also been analyzed. A functional analysis of mechanical effects on the transmission parameters of the optical fiber has been conducted, in particular, microbends and macrobends, and the relative elongation of the cable. A method for assessing the impact of bends on the transmission parameters of the optical fiber has been proposed, in particular, to determine the degree of influence of the number of turns on the amount of losses, as well as the influence of the bend radius.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	10
1.1 Оптоволоконні технології.....	10
1.2 Технології оптоволоконного зв'язку.....	13
1.3 Виготовлення кабелів.....	17
1.4 Особливості застосування оптоволоконних технологій для керування БПЛА.....	19
1.5 Ризики застосування оптоволоконних кабелів для дистанційного керування БПЛА.....	20
1.6 Висновки до розділу 1.....	22
РОЗДІЛ 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА.....	24
2.1 Фактори загасання сигналу в оптоволокні.....	24
2.2 Фактори, що впливають на поляризаційно-модову дисперсію.....	34
2.3 Функціональний аналіз механічних впливів на передавальні параметри оптичного волокна.....	36
2.4 Боротьба з механічними впливами.....	43
2.5 Зовнішні електромагнітні впливи.....	49
2.6 Вплив температур.....	58
2.7 Висновки до розділу 2.....	66
РОЗДІЛ 3. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА.....	67
3.1 Дослідження впливу вигинів на передавальні параметри оптоволокна.....	67
3.2 Висновки до розділу 3.....	76
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ.....	77
4.1 Охорона праці.....	77
4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	79

4.3 Висновки до розділу 4.....	81
ВИСНОВКИ.....	82
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	84
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність. Сьогодні відбувається стрімкий перехід на використання цифрових оптоволоконних ліній зв'язку. Однак, специфічність оптоволоконного кабелю зв'язку полягає не тільки в особливостях поширення інформаційного сигналу, а й у конструкції самого волокна, критичності його до різноманітних впливів і навантажень. Оптичне волокно чутливе до впливів екзогенних факторів, зокрема вологи, температури, радіації, зовнішніх електромагнітних впливів, електротермічної деградації, механічних впливів. Всі ці фактори призводять до збільшення згасання, а також на поверхні волокна з'являються мікротріщини і відбувається його руйнування.

Вивчення питань впливу екзогенних факторів на передавальні параметри оптичного волокна є актуальним при проектуванні високоефективних оптоволоконних ліній зв'язку. Так, сьогодні в Україні починають стрімко розвиватися технології застосування оптоволокон для організації керування БПЛА, зокрема FPV дронами. При цьому в конструкції такого БПЛА розміщується котушка з оптоволоконним кабелем, який в процесі руху дрона розмотується. Однак, мало дослідженим є питання втрат в оптоволоконі, яке є змотане в бухті. Так, зазвичай оптоволоконний кабель є розмотаний та спеціальним чином прокладений і має мінімальну кількість згинів, а самі згини є зачасту незначними. Однак, коли такий кабель знаходиться змотаним в бухні, то радіус згину для використання для FPV дронів є досить малим і відповідно вплив на передачу даних може бути відчутним. Також, враховуючи те, що оптоволокно буде розмотуватись від дрона у відкритому просторі, на нього будуть діяти такі додакові зовнішні фактори, як навколишня температура, вологість, тиск повітря, радіаційні впливи тощо.

Все це може вносити додаткові обмеження на використання цієї технології для керування FPV дроном, або потребувати внесення певних

коректив чи змін у способи модуляції і перетворення сигналів. Тому проаналізуємо впливи цих екзогенних факторів більш детально.

Таким чином, розроблення методу оцінювання впливу екзогенних факторів на оптоволоконні канали зв'язку є актуальним завданням.

Мета. Розроблення методу оцінювання впливу екзогенних факторів на оптоволоконні канали зв'язку. **Задачі:**

- аналіз оптоволоконних технологій, зокрема типів та методів виготовлення оптичних волокон, способів організації оптоволоконного зв'язку;
- аналіз особливостей застосування оптоволоконних технологій, зокрема для керування БПЛА
- аналіз типів екзогенних факторів, що впливають на оптоволоконні канали зв'язку;
- метод оцінювання степені впливу екзогенних факторів на оптоволоконні канали зв'язку.

Об'єкт дослідження: процес оцінювання впливу екзогенних факторів на оптоволоконні канали зв'язку.

Предмет дослідження: метод оцінювання впливу екзогенних факторів на оптоволоконні канали зв'язку.

Наукова новизна. Запропоновано метод оцінювання впливу екзогенних факторів на оптоволоконні канали зв'язку.

Практичне значення. Результати можуть бути імплементовані в процесі тестування та налагодження оптоволоконних каналів зв'язку для підвищення їхньої ефективності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Оптиковолоконні технології

Скловолоконна серцевина та оболонка мають різний показник заломлення, який вигинає вхідне світло під певним кутом.

Коли світлові сигнали надсилаються через оптиковолоконний кабель, вони відбиваються від серцевини та оболонки серією зигзагоподібних відскоків, що називається повним внутрішнім відбиттям. Світлові сигнали рухаються з швидкістю менше ніж у світла через більш щільні шари скла, натомість поширюються приблизно на 30% повільніше, ніж швидкість світла.

Щоб відновити або посилити сигнал протягом усього його шляху, оптиковолоконна передача іноді потребує повторювачів на віддалених інтервалах. Ці повторювачі регенерують оптичний сигнал шляхом перетворення його в електричний сигнал, обробки цього електричного сигналу та повторної передачі оптичного сигналу.

Оптиковолоконні кабелі тепер можуть підтримувати сигнали зі швидкістю до 10 Гбіт/с. Як правило, зі збільшенням пропускної здатності оптиковолоконного кабелю він стає дорожчим.

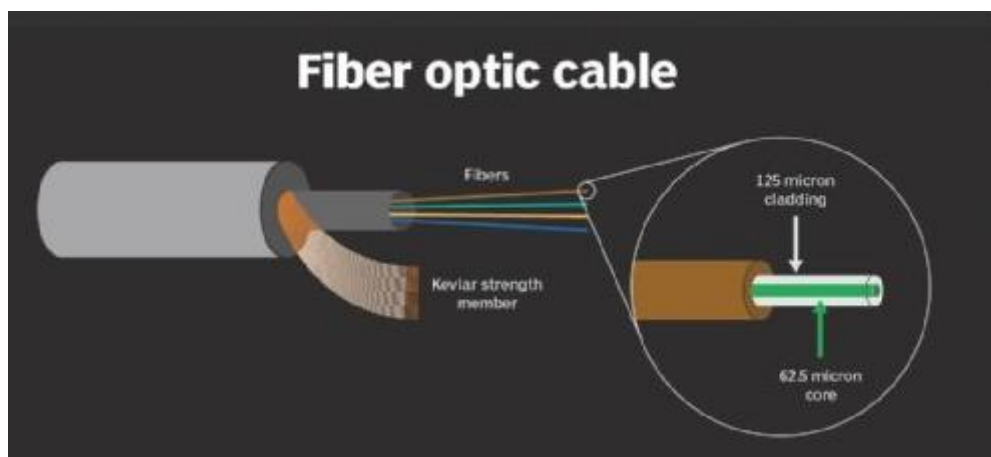


Рис. 1.1. Структура оптиволокна

Багатомодове і одномодове волокно є двома основними типами оптоволоконного кабелю.

Одномодове волокно використовується для більшої відстані завдяки меншому діаметру серцевини скловолокна. Цей менший діаметр зменшує можливість ослаблення, що є зменшенням потужності сигналу. Менший отвір ізолює світло в один промінь, створюючи більш прямий маршрут і дозволяючи сигналу подолати більшу відстань.

Одномодове волокно також має значно кращу пропускну здатність, ніж багатомодове волокно. Джерелом світла, що використовується для одномодового волокна, зазвичай є лазер. Одномодове волокно зазвичай дорожче, оскільки вимагає точних розрахунків для створення лазерного світла в меншому отворі.

Багатомодове волокно використовується для коротших відстаней, оскільки більший отвір серцевини дозволяє світловим сигналам більше разів відбиватися. Більший діаметр дозволяє одночасно надсилати кілька світлових імпульсів через кабель, що призводить до більшої передачі даних. Це також означає більше можливостей для втрати сигналу, зниження або перешкод. Багатомодова волоконна оптика зазвичай використовує світлодіоди для створення світлового імпульсу.

Мідні кабелі протягом багатьох років були традиційним вибором для телекомунікацій, мереж і кабельних з'єднань. Однак з часом волоконна оптика стала звичайною альтернативою. Більшість міжміських ліній телефонних компаній тепер складаються з волоконно-оптичних кабелів.

Оптичне волокно передає більше інформації, ніж звичайний мідний дріт, завдяки більшій пропускну здатності та вищій швидкості. Оскільки скло не проводить електрику, волоконна оптика не схильна до електромагнітних перешкод, що мінімізує втрати сигналу.

Щільне мультиплексування за довжиною хвилі використовується для збільшення пропускну здатності існуючих оптоволоконних мереж.

Dense wave division multiplexing

Bidirectional operation

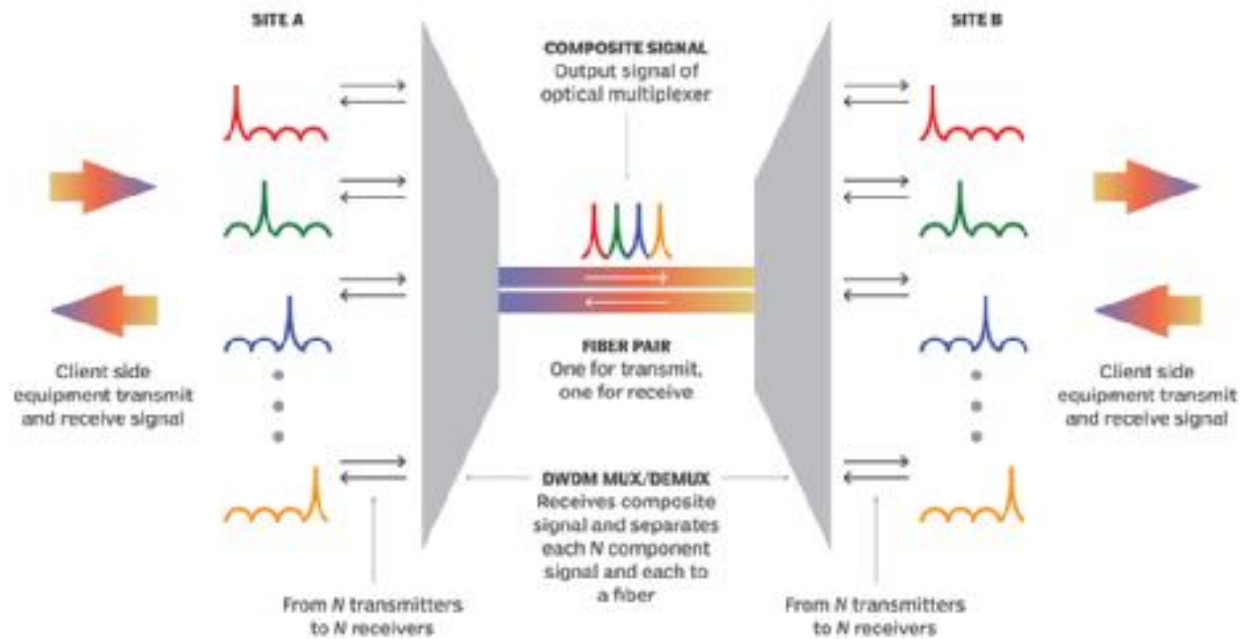


Рис. 1.2. WDM технологія

Оптоволоконні кабелі є кращими ніж мідні кабелі. Переваги включають наступне:

- вони підтримують кращу пропускну здатність.
- світло може поширюватися далі, не потребуючи значного підсилення сигналу.

- вони менш чутливі до перешкод, таких як електромагнітні перешкоди.
- не бояться води.
- волоконно-оптичні кабелі міцніші, тонші та легші, ніж мідні кабелі.
- їх не потрібно так часто обслуговувати або замінювати.

Однак важливо відзначити, що волоконна оптика має недоліки. Ці недоліки включають наступне:

- оптоволокно часто дорожче за мідний дріт.
- скловолокно вимагає більшого захисту в зовнішньому кабелі, ніж мідь.
- монтаж нового кабелю трудомісткий.

- оптоволоконні кабелі часто більш крихкі. Наприклад, волокна можуть бути зламані або сигнал може бути втрачений, якщо кабель зігнутий або вигнутий радіусом у кілька сантиметрів.

1.2 Технології оптоволоконного зв'язку

Оптоволокну, вперше розроблене в 1970-х роках, здійснило революцію в галузі телекомунікацій і відіграло важливу роль у початку інформаційної ери. Завдяки своїм перевагам над електричною передачею, оптичні волокна значною мірою замінили мідні дроти зв'язку в магістральних мережах у розвинених країнах.

Процес обміну даними за допомогою волоконної оптики включає в себе наступні основні етапи:

- створення оптичного сигналу за допомогою передавача, зазвичай з електричного сигналу
- ретрансляція сигналу вздовж волокна, гарантуючи, що сигнал не стане занадто спотвореним або слабким
- приймання оптичного сигналу
- перетворюючи його в електричний сигнал

З 1990 року, коли системи оптичного підсилення стали комерційно доступними, телекомунікаційна галузь проклала велику мережу міжміських і трансокеанських оптоволоконних ліній зв'язку. До 2002 року була завершена міжконтинентальна мережа з 250 000 км підводного кабелю зв'язку з пропускною здатністю 2,56 Тбіт/с, і хоча конкретна пропускна здатність мережі є привілейованою інформацією, звіти про інвестиції в телекомунікації показують, що потужність мережі різко зросла з 2004 року. Станом на 2020 рік по всьому світу було прокладено понад 5 мільярдів кілометрів волоконно-оптичних кабелів.

Сучасні волоконно-оптичні системи зв'язку зазвичай включають оптичні передавачі, які перетворюють електричні сигнали в оптичні сигнали,

оптоволоконні кабелі для передачі сигналу, оптичні підсилювачі та оптичні приймачі для перетворення сигналу назад в електричний сигнал. Інформація, що передається, зазвичай є цифровою інформацією, створеною комп'ютерами або телефонними системами.



Рис. 1.3. Модуль GBIC — це оптичний і електричний приймач, пристрій, що поєднує передавач і приймач в одному корпусі. Електричний роз'єм знаходиться вгорі праворуч, а оптичні роз'єми — унизу ліворуч.

Параметри деяких оптоволоконних кабелів

Одномодові кабелі						
Organization	Aggregate speed	Bandwidth	Spectral efficiency, (bit/s)/Hz	WDM channels	Per-channel speed	Distance
Alcatel-Lucent	15.5 Tbit/s			155	100 Gbit/s	7000 km
NTT	69.1 Tbit/s			432	171 Gbit/s	240 km
NEC	101.7 Tbit/s			370	273 Gbit/s	165 km
KIT	26 Tbit/s			336	77 Gbit/s	50 km
BT & Huawei	5.6 Tbit/s			28	200 Gbit/s	~140 km?
Nokia Bell Labs, Deutsche Telekom & Technical University of Munich	1 Tbit/s		5–6.75	4	250 Gbit/s	419–951 km
Nokia-Alcatel-Lucent	65 Tbit/s					6600 km
BT & Huawei	11.2 Tbit/s		6.25	28	400 Gbit/s	250 km
RMIT, Monash & Swinburne Universities	39.0–40.1 Tbit/s	~4 THz	10.4 (10.1–10.4)	160	244 Gbit/s	76.6 km
UCL	178.08 Tbit/s	16.83 THz	10.8	660 (S, C, L bands)	270 Gbit/s	40 km
NICT	301 Tbit/s	27.8 THz	10.8	1097 (E, S, C, L bands)	250–300 Gbit/s	50–150 km
NICT	402 Tbit/s	37.6 THz	10.7	1505 (O, E, S, C, L, U bands)	170–320 Gbit/s	50 km

Багатомодові кабелі									
Organization	Aggregate speed	Per core speed	Bandwidth	Spectral efficiency, (bit/s)/Hz	No. of propagation modes	No. of cores	WDM channels (per core)	Per channel speed	Distance
NICT	109.2 Tbit/s	15.6 Tbit/s				7			
NEC, Corning	1.05 Pbit/s	87.5 Tbit/s				12			52.4 km
University of Southampton	73.7 Tbit/s	73.7 Tbit/s				1 (hollow)	3 × 96 (mode DM)	256 Gbit/s	310 m
Technical University of Denmark	43 Tbit/s	6.14 Tbit/s				7			1045 km
Eindhoven University of Technology (TU/e) and University of Central Florida (CREOL)	255 Tbit/s	36.4 Tbit/s				7	50	~728 Gbit/s	1 km
NICT, Sumitomo Electric and RAM Photonics	2.15 Pbit/s	97.7 Tbit/s				22	402 (C, L bands)	243 Gbit/s	31 km
NTT	1 Pbit/s	31.25 Tbit/s			single-mode	32	46	680 Gbit/s	205.6 km
KDDI Research and Sumitomo Electric	10.16 Pbit/s	535 Tbit/s			6-mode	19	739 (C, L bands)	120 Gbit/s	11.3 km
NICT	159 Tbit/s	159 Tbit/s			tri-mode	1	348	414 Gbit/s	1045 km
NICT	10.66 Pbit/s	280.5 Tbit/s	9.2 THz	30.5	tri-mode	38	368 (C, L bands)	762 Gbit/s	13 km
NICT	319 Tbit/s	79.8 Tbit/s			single-mode	4	552 (S, C, L bands)	144.5 Gbit/s	3001 km (69.8 km)
NICT	1.02 Pbit/s	255 Tbit/s				4	801 (S, C, L bands)		51.7 km
Technical University of Denmark	1.84 Pbit/s	49.7 Tbit/s				37	223	223 Gbit/s	7.9 km
NICT	1.53 Pbit/s	1.53 Pbit/s	4.6 THz	332	55 (110-MIMO multiplexer)	1	184 (C-band)	1.03 Tbit/s	25.9 km
NICT	22.9 Pbit/s	603 Tbit/s	18.8 THz	32	tri-mode	38	750 (S, C, L bands)	803.5 Gbit/s	13 km

Коли канал зв'язку має охоплювати більшу відстань, ніж здатна підтримати волоконно-оптична технологія, сигнал має бути регенований у проміжних точках каналу за допомогою оптичних ретрансляторів зв'язку. Повторювачі додають значних витрат на систему зв'язку, тому розробники систем намагаються мінімізувати їх використання.

Останні досягнення в волоконно-оптичних комунікаційних технологіях зменшили погіршення сигналу до такої міри, що регенерація оптичного сигналу потрібна лише на відстані в сотні кілометрів. Це значно знизило вартість оптичних мереж, особливо над підводними прольотами, де вартість і надійність повторювачів є одним із ключових факторів, що визначають продуктивність усієї кабельної системи. Основними досягненнями, які сприяють цьому покращенню продуктивності, є керування дисперсією, яке спрямоване на збалансування ефектів дисперсії та нелінійності, і солітони, які використовують нелінійні ефекти у волокні, щоб забезпечити бездисперсійне поширення на великі відстані.

Для того, щоб різні виробники могли розробляти компоненти, які сумісно функціонують у волоконно-оптичних системах зв'язку, було розроблено низку стандартів. Міжнародний союз електрозв'язку публікує кілька стандартів, що стосуються характеристик і продуктивності самих волокон:

ITU-T G.651, «Характеристики 50/125 мкм багатомодового волоконно-оптичного кабелю з градуйованим індексом»

ITU-T G.652, «Характеристики одномодового оптоволоконного кабелю»

Інші стандарти визначають критерії продуктивності оптоволоконна, передавачів і приймачів, які повинні використовуватися разом у відповідних системах. Деякі з цих стандартів:

100 Gigabit Ethernet

10 Gigabit Ethernet

Fibre Channel

Гігабітний Ethernet

Оптична транспортна мережа (OTN)

TOSLINK — це найпоширеніший формат цифрового аудіокабелю, який використовує пластикове оптичне волокно для підключення цифрових джерел до цифрових приймачів.

1.3 Виготовлення кабелів

Виробництво оптичного волокна – це процес виготовлення оптичного волокна із тетрахлориду кремнію та іншої сировини. Цей процес виробництва оптичного волокна визначає механічну міцність, передатні характеристики та термін служби оптичного волокна, що дуже важливо для забезпечення якості оптичного волокна та волоконно-оптичного кабелю.

Процес виробництва оптичного волокна включає два основні процеси: виготовлення преформи оптичного волокна та волочіння волокна.

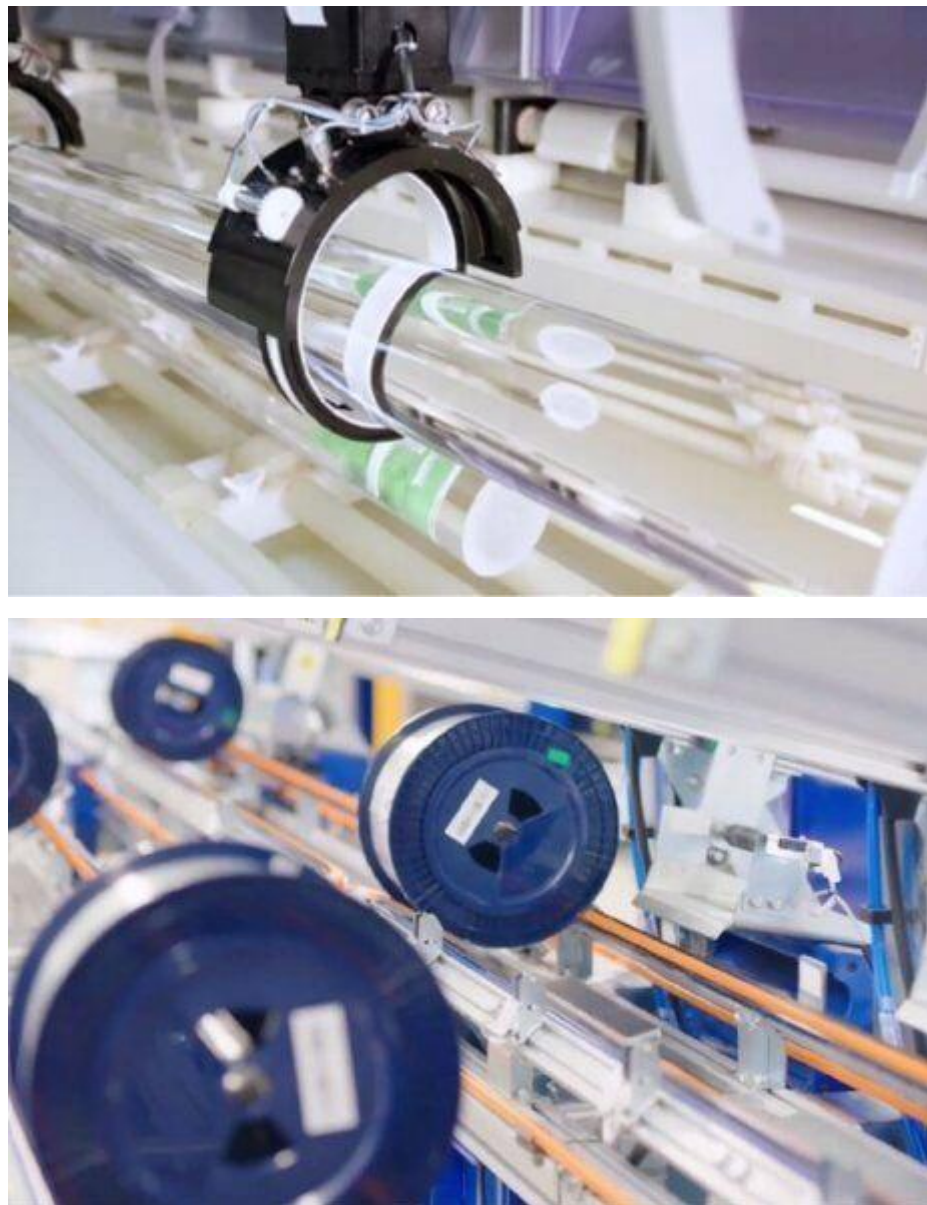


Рис. 1.4. Виготовлення оптокабелів

Виробництво преформ для оптичного волокна переважно включає процеси MCVD, OVD і VAD. MCVD є найбільш поширеною технологією виробництва, яка дозволяє отримати волокно з низькими втратами, що добре підходить для оптоволоконних кабелів зв'язку на великі відстані.

Процес MCVD був розроблений компанією Bell Labs в 1974 році. Він вводить газоподібну суміш, що складається з SiCl_4 (хлорид кремнію), GeCl_4 (хлорид германію) та інші хімічні речовини в трубку з кварцового скла (оболонку). І обертається при нагріванні зовні кварцової трубки для окислення кремнію та германію з утворенням SiO_2 (діоксид кремнію) та GeO_2 (діоксид германію), які будуть знаходитись у кварцовій трубці, утворюючи основну частину оптичного волокна.

Показник заломлення, коефіцієнт розширення та температура плавлення оптичного волокна можуть контролюватись концентрацією компонентів газоподібної суміші. Після охолодження преформи оптичного волокна вона випробовується на якість (показник заломлення).

Волочення оптичного волокна відноситься до операційного процесу розміщення заготовок оптичного волокна в вертикальну систему волочіння волокна, де заготовки волокна нагріваються і розплавляються певним нагрівальним пристроєм, а потім витягуються в невеликі оптоволокна з діаметром, відповідним вимогам. При цьому співвідношення діаметрів серцевини та оболонки та розподіл показника заломлення оптичного волокна залишаються незмінними.

Преформа оптичного волокна поміщається у волочильну вежу. Преформа оптичного волокна витягується в оптичне волокно завтовшки 125 мкм і покривається шарами смоли для захисту.

У волочильній вежі знаходиться графітова піч, яка може генерувати високу температуру 17000 – 2200°C для розм'якшення преформи. Потім намотується на витяжне колесо для створення тонкого оптичного волокна. Волочильна вежа оснащена системою зворотного зв'язку, яка

використовується для зворотного зв'язку з температурою печі, швидкістю намотування і т.д., щоб точно контролювати діаметр волокна за допомогою лазерного мікрометра.

Волокно 125 мкм, витягнуте з преформи, термічно деформоване, але на поверхні голого волокна все ще залишаються мікротріщини. Коли воно піддається впливу атмосфери, вода, що міститься в ній, викликає розширення мікротріщин. А тривала дія призведе до руйнування волокна.

Для підвищення міцності оптичного волокна тонкий шар смоли повинен бути своєчасно нанесений на оптичне волокно в процесі волочіння і своєчасно висушений, щоб уникнути цього і взаємної адгезії.

1.4 Особливості застосування оптоволоконних технологій для керування БПЛА

Сьогодні в Україні починають стрімко розвиватися технології застосування оптоволокон для організації керування дронами (БПЛА), зокрема FPV дронами. При цьому в конструкції такого БПЛА розміщується котушка з оптоволоконним кабелем, який в процесі руху дрона розмотується.

Прикладом такого дрона може слугувати дрон "Бандерик-Стрічка". При цьому дрон стає нечутливим до роботи будь яких систем РЕБ, оскільки фізичні процеси передачі даних є нечутливими до їхнього впливу.

FPV-дрони використовують волоконну оптику замість радіоканалів для управління та передачі відео, що може стати перспективним напрямком розвитку цього виду зброї.

БПЛА «Бандерик-Стрічка» володіє такими характеристики: вантажопідйомність не більше 3 кг, час перебування 15 хв., довжина польоту до 1 км.



Рис. 1.5. БПЛА «Бандерик-Стрічика»

Ще однією перевагою є неможливість запису операцій дрона або розпізнавання оператора за допомогою бездротового електронного інтелекту.

Можливість керувати значно більшою кількістю дронів одночасно без проблем їхнього скупчення в межах одного радіусу дії, що робить керування більш складним.

Крім того, можна було б розмістити обчислювальну потужність «машинного зору» для автоматичного виявлення та атаки на цілі.

До об'єктивних недоліків можна віднести обмежений радіус дії через довжину оптоволокна, можливість пошкодження та втрати дрона.

Тепер проаналізуємо особливості волоконно-оптичних технологій та перспективи їх використання для керування БПЛА.

1.5 Ризики застосування оптоволоконних кабелів для дистанційного керування БПЛА

Можна виділити декілька недоліків чи застережень стосовно застосування оптоволокна для керування БПЛА. До об'єктивних недоліків можна віднести обмежений радіус дії через довжину оптоволокна, можливість пошкодження та втрати дрона.



Рис. 1.6. Бухна оптоволоконна на ДПЛА

Під час польоту трос поступово розмотується і зупиняється на дереві чи іншій перешкоді. Єдине обмеження - небажано змінювати напрямок або різко падати, а потім підійматись, щоб не замотати волокно.

«Керувати FPV з оптикою набагато простіше.

Пілот не втрачає зображення, тому політ в електронній зоні не потребує навичок і розуміння принципів радіогоризонту».

Друга причина скептизму експертів – висока вартість волоконної оптики.

Торік лише 10-кілометрова котушка такого кабелю коштувала близько 3000 доларів. А це в 12 раз дорожче, ніж звичайний квадрокоптер FPV.

І, нарешті, третій недолік оптоволоконних дронів полягає в тому, що вони можуть перевозити менші корисні навантаження. Ця проблема дійсно існує, тому що крім боєприпасів такі БПЛА мають нести ще й досить важкі кабелі. Типова котушка важить приблизно 1,2 кг на 10 км і приблизно 2 кг на 15 км.

Тому FPV дрон з корисним навантаженням 3-4 кг може «нести» невеликі боєприпаси до 1,5 кг.

Однак, мало дослідженим є питання втрат в оптоволоконні, яке є змотане в бухті. Так, зазвичай оптоволоконний кабель є розмотаний та спеціальним

чином прокладений і має мінімальну кількість згинів, а самі згини є зазвичай незначними. Однак, коли такий кабель знаходиться змотаним в бухні, то радіус згину для використання для FPV дронів є досить малим і відповідно вплив на передачу даних може бути відчутним.

Також, враховуючи те, що оптоволоконно буде розмотуватись від дрона у відкритому просторі, на нього будуть діяти такі додакові зовнішні фактори, як навколишня температура, вологість, тиск повітря, радіаційні впливи тощо.

Все це може вносити додаткові обмеження на використання цієї технології для керування FPV дроном, або потребувати внесення певних коректив чи змін у способи модуляції і перетворення сигналів. Тому проаналізуємо впливи цих екзогенних факторів більш детально.

1.6 Висновки до розділу 1

Проведено аналіз оптоволоконних технологій, зокрема типів та методів виготовлення оптичних волокон, способів організації оптоволоконного зв'язку, обладнання, що при цьому застосовується.

Проаналізовано особливості застосування оптоволоконних технологій, зокрема для керування БПЛА. Так, сьогодні в Україні починають стрімко розвиватися технології застосування оптоволокон для організації керування дронами (БПЛА), зокрема FPV дронами. При цьому в конструкції такого БПЛА розміщується котушка з оптоволоконним кабелем, який в процесі руху дрона розмотується.

Проаналізовано ризики застосування оптоволоконних кабелів для дистанційного керування БПЛА. Встановлено, що мало дослідженим є питання втрат в оптоволоконі, яке є змотане в бухті. Так, зазвичай оптоволоконний кабель є розмотаний та спеціальним чином прокладений і має мінімальну кількість згинів, а самі згини є зазвичай незначними. Однак, коли такий кабель знаходиться змотаним в бухні, то радіус згину для використання

для FPV дронів є досить малим і відповідно вплив на передачу даних може бути відчутним.

Також, враховуючи те, що оптоволокну буде розмотуватись від дрона у відкритому просторі, на нього будуть діяти такі додакові зовнішні фактори, як навколишня температура, вологість, тиск повітря, радіаційні впливи тощо.

Все це може вносити додаткові обмеження на використання цієї технології для керування FPV дроном, або потребувати внесення певних коректив чи змін у способи модуляції і перетворення сигналів.

РОЗДІЛ 2

ОСНОВНА ЧАСТИНА

2.1 Фактори загасання сигналу в оптоволокну

2.1.1 Механічні фактори

Зовнішні фактори, що впливають на передавальні параметри ОВ показані на рис. 2.1.

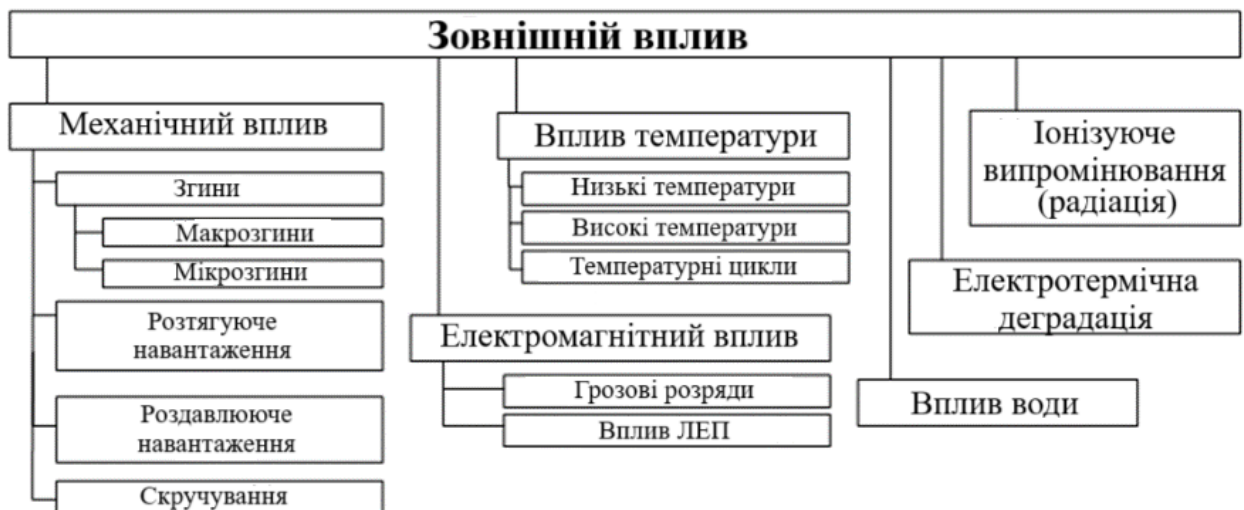


Рис.2.1. Зовнішні фактори, що впливають на ОВ

При виготовленні кабеля, створенні та експлуатації ОВЛЗ оптичне волокно піддається вигинанням, розтягуванням, крученням, роздавлюванню, вібраційним навантаженням та іншим механічним впливам, які можуть призводити до пошкодження ОВ та збільшення коефіцієнта загасання.

Механічні впливи – це результат роботи сил, наслідком якого є розрив ОВ чи виникнення у ньому тріщин. Такі дії можуть тривати досить довго, а можуть бути короткочасними.

Вигинання поділяються на макровигинання та мікровигинання. У першому випадку вигинання ОВ з'являються в процесі скручування по довжині кабеля і намотування на барабан, а в другому, в основному, - в процесі

виготовлення. Однак і ті й інші досить небезпечні, тому що призводять до зростання втрат потужності у волокні, а в найгіршому випадку можуть призвести до розриву.

Втрати на макровигинаннях ОВ обумовлені витіканням або випромінюванням мод, що направляються, і стають неприпустимо великими при зменшенні радіуса кривизни вигинання до критичних значень.

Мікровигинання також призводять до втрати потужності випромінювання, вони виникають у процесі виготовлення кабеля, спостерігаються по всій довжині волокна, мають випадковий характер.

Макровигинання при малому радіусі можуть провокувати безліч мікрозгинів в ОВ.

Розтягуючі впливи спостерігаються при експлуатації в мережах зв'язку, зберіганні, а також при створенні ОВЛЗ. Така дія має різний характер залежно від розташування волокна, наприклад, при зберіганні на котушці навантаження на кабель буде статичним, а при підвішуванні на опорах – динамічним.

Скручування ОВ виникає в процесі виготовлення кабеля або в процесі його прокладки.

Роздавлююче навантаження виникає у процесі експлуатації ліній зв'язку, особливо у мережах, де кабель прокладено в ґрунті чи під водою. Також варто врахувати і тиск на ОВ, що створюється іншими складовими кабеля.

Механічні вібрації впливають на ОК, що підвішаний на опорах контактної мережі.

2.1.2 Електромагнітні впливи

Електромагнітні поля впливають як на оптичні підвісні кабелі, так і на кабелі, прокладені в землі, незалежно від того, діелектричні кабелі або містять металеві елементи.

Основні типи електромагнітних впливів:

- грозові розряди;
- вплив високовольтних ЛЕП та залізниць.

Якщо ОК є повністю діелектричним, то при ударі блискавки біля кабеля він не пошкоджується. Але світлова хвиля, що передається по ОК, під дією зовнішнього електромагнітного поля блискавки може зазнати повороту площини поляризації, що призводить до збільшення поляризаційної модової дисперсії (ПМД).

Вплив грозових розрядів (на ОК з металевими складовими) полягає в наступному: частина струму блискавки, що вдарила поблизу ОК, потрапляє в металеві складові, тим самим ушкоджуючи оболонки та інші частини конструкції. При протіканні струму блискавки металевою оболонкою може відбуватися пробій зовнішнього шланга або ізолюючих матеріалів між металевими складовими кабеля, що призводить до потрапляння води та пошкодження волокон.

Що ж до підвісних кабелів, в їх металевих елементах можливе наведення ЕРС, струмів, отже, можливі пробої ізоляційних покриттів.

Руйнування ОВ можливе у тому випадку, якщо волокно знаходиться на шляху іскрового пробою або близько від нього.

У випадку, якщо кабель підвішаний на високовольтних ЛЕП або на опорах залізниць, то можна говорити про електротермічну деградацію, тобто про руйнування оболонки ОК через протікання струмів по забрудненій поверхні оболонки (незалежно від наявності металевих складових в кабелі). Наслідком стає проникнення води, отже, з'являється можливість її накопичення, що призводить до зростання тиску на ОВ, що викликає збільшення згасання.

2.1.3 Температурні впливи

Температурні впливи – це процеси зміни температури середовища, в якому знаходиться ОК. Під середовищем маються на увазі: повітря, вода, ґрунт.

Найбільш яскраві наслідки таких впливів характерні для підвісних кабелів, так як у повітрі перепад температур зазвичай набагато більший, ніж у ґрунті або воді.

Позитивні та негативні температури викликають відповідно розширення та стиснення ОВ та інших складових кабеля, що, у свою чергу, призводить до виникнення механічних напружень в ОВ. Такі напруження призводять до зростання тріщин у волокні, а це провокує збільшення коефіцієнта згасання.

Впливи позитивних та негативних температур однаково небезпечні. Так, при знаходженні ОК в умовах підвищених температур відбувається розм'якшення оболонок, у арамідних ниток спостерігається зниження розривної міцності.

Все це призводить до збільшення навантаження безпосередньо на ОВ, тобто його стискання, а значить, спричиняє зростання коефіцієнта згасання.

Вплив низьких температур також призводить до руйнування складових кабеля, провокує тріщини, отже збільшення втрат потужності.

Також варто відзначити, що спільна дія різних температур і радіації призводить до зміни значення втрат (частіше до збільшення) в ОВ.

Негативні наслідки від впливу температур обумовлені різними значеннями коефіцієнтів стиснення та розширення матеріалів ОК та ОВ.

2.1.4 Вплив води

Вода завдає шкоди ОВ і є одним із основних факторів, що впливають на руйнування волокна. При накопиченні в кабелі вона може спричинити довгострокове зниження механічної міцності волокна. Це особливо стосується кабелів із щільною упаковкою волокон, у яких волокно протягом усього терміну служби зазнає або видовження, або стиснення.

Негативний вплив води:

Перше - вода, що потрапила в кабель, під дією негативних температур перетворюється на лід, в результаті чого у всіх складових кабеля, куди потрапила вода, з'являються тріщини, відбувається здавлювання ОВ, що призводить до пошкодження кабеля і волокна, а отже, до збільшення коефіцієнта згасання.

Друге - атоми водню, які містяться в молекулах води, через деякий час (зазвичай від 5 до 12 років) можуть проникнути у волокно, яке дуже чутливе

до водню, і викликати його «помутніння», тобто підвищене згасання та подальше порушення зв'язку. Водень, що виділяється з часом, при розкладанні води є дуже активним елементом і, вступаючи в реакцію з киснем, що становить структуру кварцу, викликає поглинання, відоме як поглинання ОН-з центром на довжині хвилі 1385 нм. Згодом цей пік захоплює і ті довжини хвиль у третьому вікні прозорості, на яких йде передача інформації, що призводить до помутніння ОВ. Вода проникає в кабель через негерметичну зовнішню оболонку, а також згодом дифундує через оболонки.

2.1.5 Вплив радіації

Дослідження впливів радіації на ОВ пов'язані з тим, що останнім часом ОК став дедалі більше застосовуватися у зонах радіоактивного випромінювання: атомні електростанції, технологічні лінії з переробки ядерних відходів. Під дією іонізуючого випромінювання ОВ можуть втрачати свою пропускну здатність.

Основна причина зростання втрат полягає у виникненні центрів забарвлення (ЦЗ) у світлопровідній серцевині або у світловідбивній оболонці, по якій в одномодових ОВ поширюється значна частина світла.

ЦЗ виникають у результаті комбінації електронів провідності з дірками та вакансіями, що з'явилися на дефектах кристалічних ґраток, що утворилися внаслідок дії радіації. Такі центри забарвлення поглинають світло в деяких частинах спектру, а отже, призводять до додаткових втрат потужності.

Варто навести деякі експерименти та їх результати. Один полягає у дії гамма-нейтронного поля ядерного реактора на ОВ. У першій частині експерименту використовувалося волокно з діаметром серцевини 310 мкм, петля близько метра поміщалася в центральний вимірювальний канал ядерного реактора і піддавалася впливу швидких нейтронів із щільністю потоку 10^{17} н/см² і потужності дози гамма-випромінювання 10^8 Р/с. Під час впливу гамма-нетронного імпульсу спостерігалось збільшення інтенсивності світла, викликане люмінесценцією, після припинення впливу описаним імпульсом амплітуда опорного сигналу склала 0,3 від початкового рівня,

наведене поглинання – 5 дБ/м. За кілька десятків мілісекунд опорний сигнал відновився до рівня 0,9, поглинання зменшилося – 0,5 дБ/м. Зміну опорного сигналу та потоку нейтронів у процесі експерименту представлено рис. 2.2. Передача інформації під час впливу імпульсу не можлива (через люмінесценцію). Наслідок впливу – наведене поглинання, спричинене структурними дефектами кристалічних ґраток кварцу.

Через деякий час після дії гамма-нейтронним імпульсом пропускна здатність ОВ практично повністю відновлюється.

Друга частина експерименту – вплив теплових нейтронів з щільністю потоку – 10^{15} н/см² та потужністю дози гамма-випромінювання 10^6 Р/с. У момент впливу імпульсу у волокні виникає наведене поглинання від 3 до 5 дБ/м, причому ОВ залишається працездатним (на відміну від першої частини експерименту). Таким чином, наведені експерименти демонструють втрати при дії радіації, а також підтверджують працездатність ОВ при певних параметрах гамма-нейтронного імпульсу.

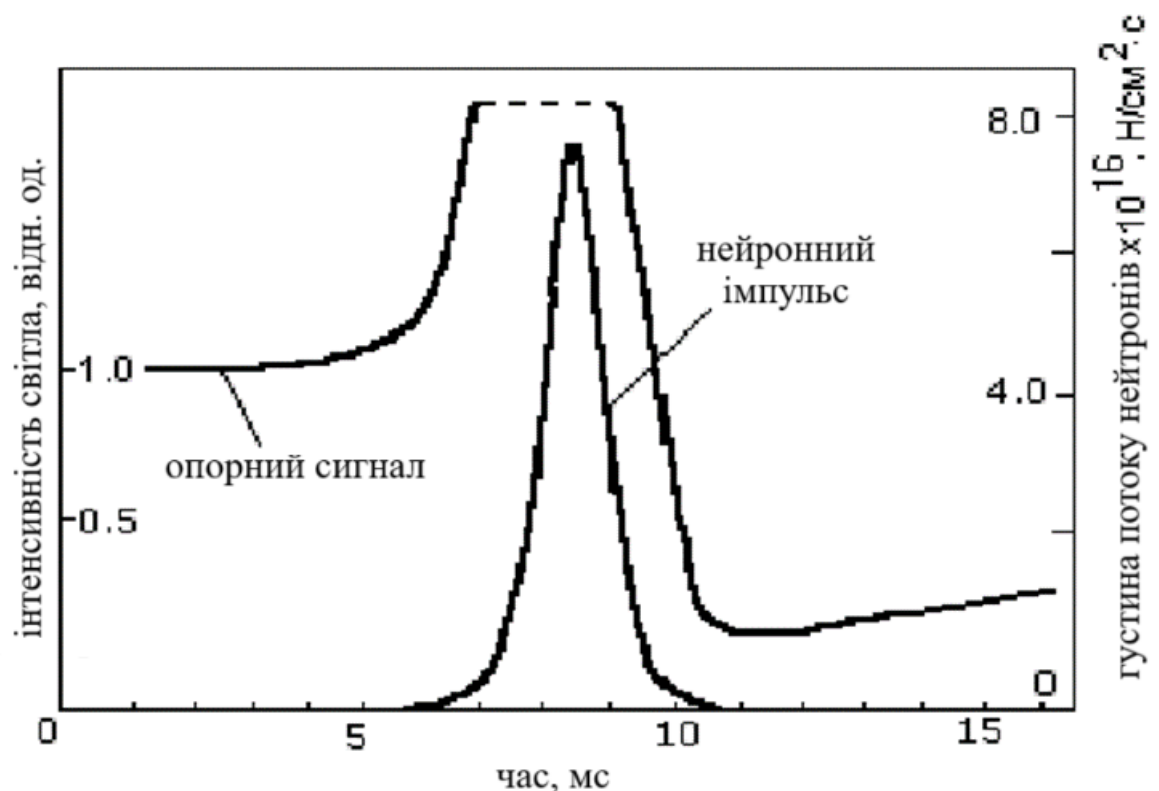


Рис. 2.2. Зміна опорного сигналу та потоку нейтронів

Інший експеримент спрямований на вивчення впливу радіації на різні типи волокон: одномодовий із ступінчастим профілем показника заломлення, багатомодовий зі ступінчастим та градієнтним профілями показника заломлення. Також досліджено вплив різних температур разом із радіацією. Опромінення здійснювалося за допомогою джерела гама-випромінювання за потужності експозиційної дози випромінювання 45 Р/с, температура змінювалася від мінус 50 до 200⁰С. Довжина опромінюваної частини оптичного волокна становила від 50 до 100 м. Загальна тенденція різних типів волокон – збільшення радіаційно наведених втрат.

Абсолютна величина втрат для одномодового волокна значно менша, ніж для багатомодового. Для кожного конкретного інтервалу температур існує значення загасання. Графіки демонструють характер залежності величини збільшення коефіцієнта згасання від експозиційної дози випромінювання за різних температур для одномодового ОВ представлені на рис. 2.3, для багатомодового волокна на рис.2.4-2.5.

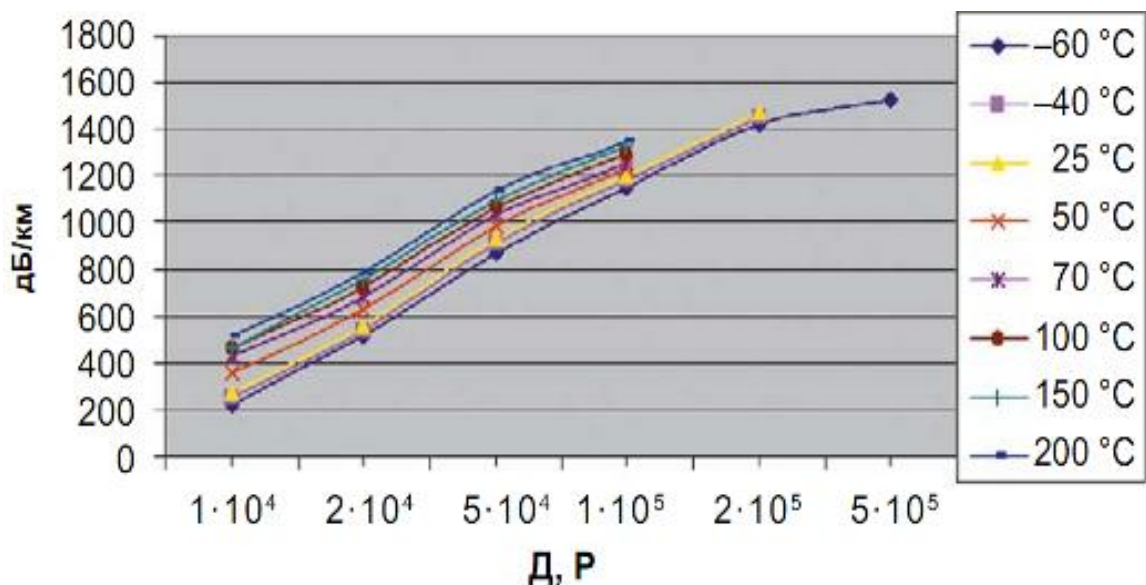


Рис. 2.3. Залежність для одномодового волокна

Спираючись на наведені графіки можна говорити, що радіація впливає на зростання величини втрат (приводить до збільшення) навіть за нормальної

температурі (20 – 25⁰С).

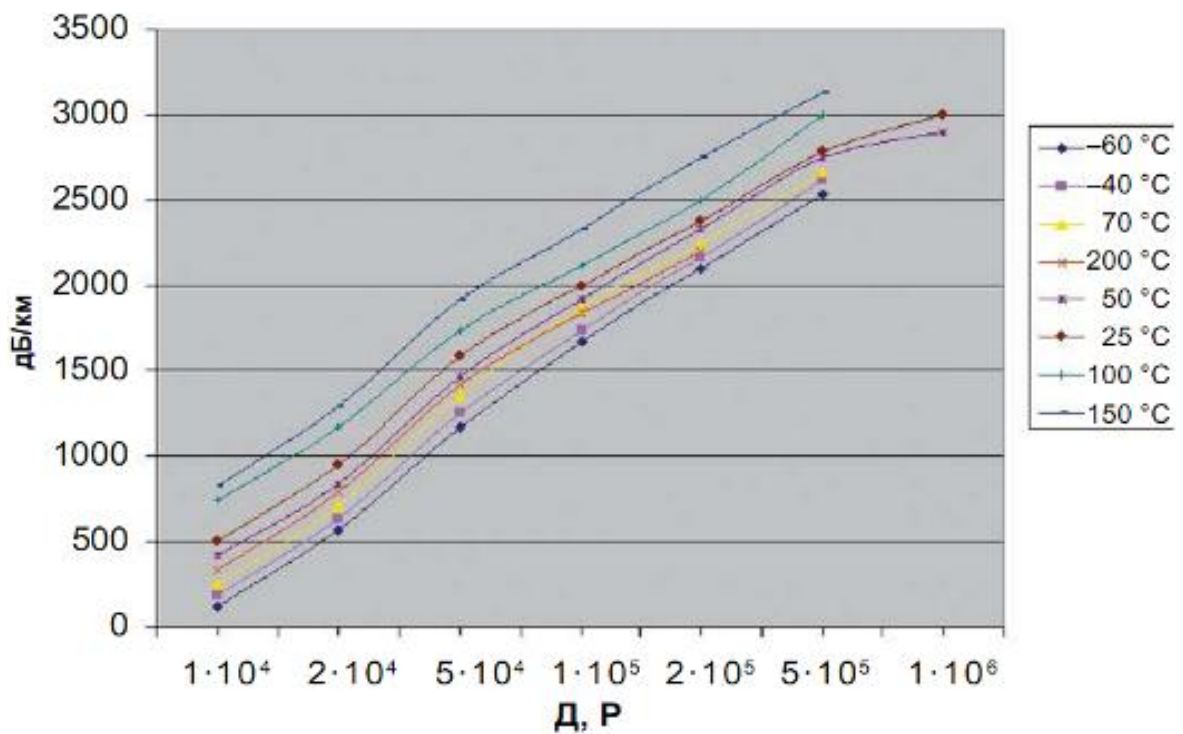


Рис. 2.4. Залежність для багатомодового волокна з градієнтним профілем показника заломлення

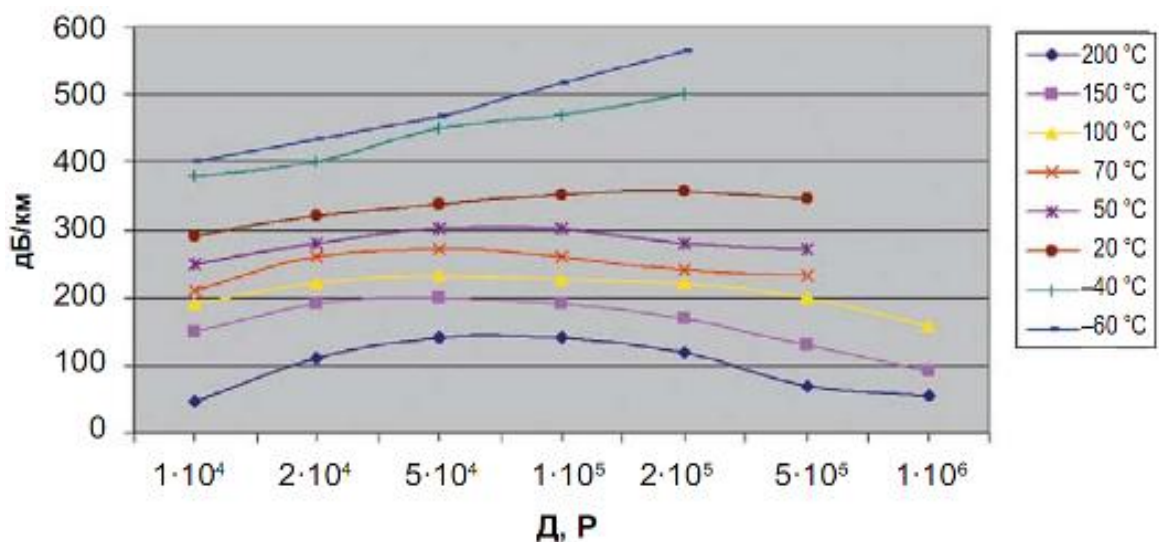


Рис. 2.5. Залежність для багатомодового волокна із ступінчастим профілем показника заломлення

Варто відзначити, що радіаційна дія може з'являтися при ударах блискавки, особливо в горах та поблизу високих будівель.

2.1.6 Електротермічна деградація

Електротермічна деградація ОК виявляється у руйнуванні підтримуючих затискачів та конструктивних елементів у місці накладання затискачів, у появі здуття оболонки в прольотах між опорами.

Основними факторами, що викликають електротермічну деградацію, є:

- ємнісні струми витоку, що виникають на забрудненій поверхні ОК під дією змінних електромагнітних полів, що створюються контактною мережею та іншими високовольтними проводами, що підвішані на опорах контактної мережі;
- струми витоку контактної мережі, живлячих та підсилюючих проводів змінного струму, що пов'язані з підвищеним опором заземлень та із забрудненням ізоляторів;
- вплив електромагнітного поля, що викликає процеси поляризації в діелектричних елементах ОК, що супроводжуються виділенням тепла.

Струм витоку зростає через зменшення питомого опору поверхні оболонки. Питомий опір поверхні оболонки зменшується при зволоженні та подальшому висиханні забруднених ділянок оболонки. Працездатність ОК зберігається до тих пір, поки цей опір не досягне критичного значення, при якому стає можливим утворення дугового розряду. Мінімально допустима величина питомого опору обернено пропорційна величині напруги, що наводиться на оболонці, яка в залежності від розміщення кабелю на опорі може досягати 20 кВ. Питомий опір зменшується в міру старіння оболонки кабелю під впливом кліматичних факторів, забруднень, інтенсивність яких обумовлена місцем розташування, типом вантажів, що перевозяться, близькістю пожеж. Тобто питомий опір залежить стану поверхні кабелю, отже, від терміну його експлуатації.

Процеси електротермічної деградації під впливом струмів витоку розвиваються так: забруднена і зволожена поверхня кабелю поступово висихає під впливом вітру, сонця і нагрівання струмами витоку, на сухих ділянках (рівних діаметру кабелю) виникають перші дугові розряди; у міру експлуатації

кабеля поверхневий опір знижується, потужність, що розсіюється, зростає, коли розсіювана потужність досягає деякого критичного значення, з'являються мікродуги і мікророзряди, що призводять до перепалу кабеля. При зниженні поверхневого опору до 2 кОм/см, потужність, що розсіюється, досягає максимального значення. Чим менше стає питомий опір, тим більше струми витоку на землю.

Коронні, поверхневі часткові та ковзні розряди негативно впливають на надійність роботи ОК, з'являються внаслідок впливу електричного поля великої напруженості. На переході від сухого кабеля до затискача напруга коронування досить мала, її підвищення призводить до виникнення мікродуг, кабель різко деградує – з'являються треки (пропалені канали), спалахує оболонка. Тривалий процес коронування на переході від ОК до затискача супроводжується утворенням озону та оксидів азоту, що є агресивними окислювачами. При певних значеннях потужності коронувальний процес (приводить до деградації поверхні) може переходити до дугового розряду (приводить до термічного руйнування).

Деградація як здуття оболонки виникає під впливом тепла від горіння очерету чи трави поблизу траси підвіски ОК чи під впливом зовнішнього електромагнітного поля. Напрямок здуття збігається з напрямком, вздовж якого напруженість поля змінюється з більшою швидкістю (з градієнтом електричного поля).

Причини електротермічної деградації в затискачах є наступними:

- неоднорідність складу та електричного опору вставки;
- недостатня температурна межа крихкості та морозостійкості;
- високий коефіцієнт озонного старіння;
- недостатня стійкість до вібрацій;
- недостатня здатність до сезонних переміщень кабеля в затискачі.

Гумова вставка під впливом низьких температур (мінус 15 С) твердне і перестає виконувати свої функції, що призводить до потрапляння вологи в кабель, а значить до розвитку електротермічної деградації.

2.2 Фактори, що впливають на поляризаційно-модову дисперсію

2.2.1 Механічні фактори

Поляризаційно-модова дисперсія – дисперсія, викликана двопронезаломленням в ОВ: розділенням випромінювання на ортогонально поляризовані моди, що поширюються по ОВ з різною швидкістю вздовж швидкої і повільної осей. Така дисперсія викликає затримку між двома основними станами поляризації.

На величину поляризаційно-модової дисперсії впливають такі типи механічних факторів:

- здавлювання;
- вигин;
- скручування.

Зі зростанням механічного навантаження значення поляризаційно-модової дисперсії збільшується.

Механічне навантаження - причина залишкової напруженості в оптичному волокні. Наслідком таких навантажень виявляються випадково розподілені деформації волокон, що порушують співвісність та геометрію волокна, тим самим збільшують значення поляризаційно-модової дисперсії.

2.2.2 Електромагнітні впливи

Електромагнітні поля впливають на діелектричний ОК не менше, ніж на кабель, що містить металеві елементи.

При ударах блискавки в землю поблизу ОК виникає поворот площини поляризації поширюваного по ньому світла. Зміна площини світлової поляризації призводить до подвійного променезаломлення та виникнення двох ортогональних складових хвиль, між якими розподіляється енергія сигналу, кожна зі складових поширюється незалежно одна від одної, параметри волокна вздовж різних площин відрізняються, отже це провокує збільшення поляризаційно-модової дисперсії.

Тобто поворот поверхні світлової поляризації відбувається при взаємодії поля хвилі в волокні із зовнішніми поперечними електричними і поздовжніми магнітними полями. Чим більший кут повороту площини поляризації, тим більше значення поляризаційно-модової дисперсії.

2.2.3 Вплив температур

При зміні температури ОВ перебуває у напруженому стані.

При високих температурах від 40 до 60 С волокно знаходиться в ненапруженому стані, так як полімери розм'якшуються.

При температурах від мінус 5 до мінус 35 С значення поляризаційно-модової дисперсії практично не змінюється і є мінімальним. Якщо температура виявляється нижче, то величина поляризаційно-модової дисперсії збільшується через деформацію захисно-зміцнюючого покриття ОВ. Деформоване захисно-зміцнювальне покриття стискає ОВ, чим викликає в ньому додаткові напруження, а значить збільшення поляризаційно-модової дисперсії.

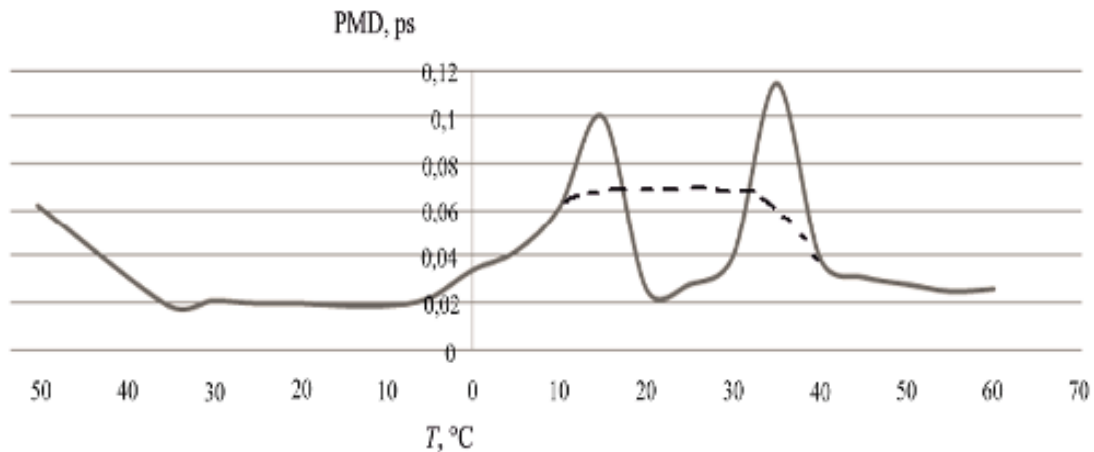


Рис. 2.6. Залежність значення поляризаційно-модової дисперсії від температури

2.3 Функціональний аналіз механічних впливів на передавальні параметри оптичного волокна

2.3.1 Види механічних впливів

Механічні впливи можуть мати різний характер, залежно від того, що є

причиною.

Серед них вигинання є найпоширенішими та найнебезпечнішими. Вигинання діляться на мікрівигинання та макровигинання.

Мікрівигинання виникають при виробництві ОВ, а також при виробництві та прокладанні ОК. Вони спричиняють збільшення втрат у кабелі. Основною причиною виникнення цих втрат є те, що при виробництві кабелю волокно стискається недостатньо гладкими зовнішніми покриттями. Вигинання такого роду існують по усій довжині волокна і тому можуть вносити суттєві згасання.

Мікрозгини - це відхилення осі світловода від прямої лінії. Втрати на мікрозгинах оцінюються за такою формулою:

$$\alpha_{\text{мікро}} = N \frac{h^2 a^4}{(2b)^6 \Delta^3} \cdot 10^{-3}, \quad (2.1)$$

де h - висота (радіус) мікрозгинання; a - радіус серцевини ОВ; $2b$ - діаметр ОВ по оболонці; N - число мікрозгинів; Δ – відносна різниця коефіцієнтів заломлення.

Вид мікрозгинання представлений рис. 2.7.

Періоди мікрозгинів – це одиниці міліметрів (сантиметрів), амплітуда – частки чи одиниці мікрометрів.

Макровигинання виникають при прокладанні та монтажі, а також при намотуванні на барабан. Втрати викликані витіканням або випромінюванням мод, і при зменшенні радіуса кривизни вигину до критичних значень стають неприпустимо великими.

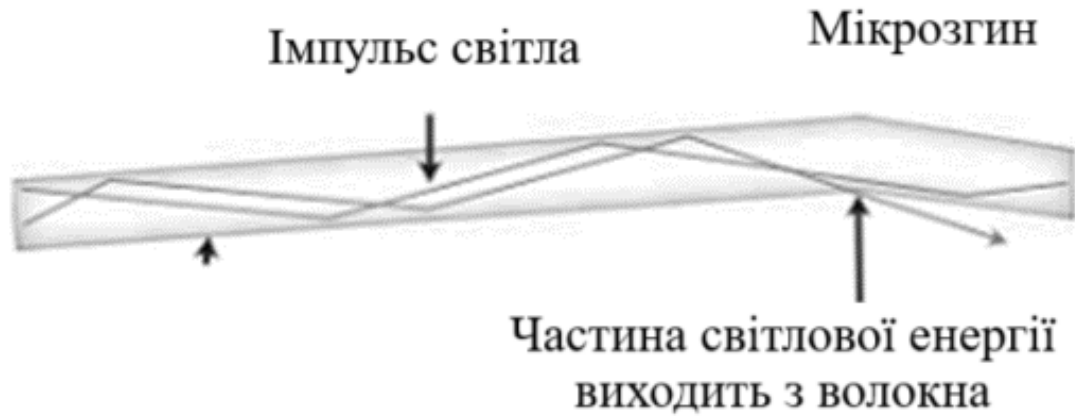


Рис. 2.7. Мікрівигинання ОВ

Критичний радіус вигинання волокна приблизно розраховується за формулою:

$$R_{кр} \approx \frac{3n_1^2 \lambda}{4\pi(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2.2)$$

де n_1 , n_2 - показники заломлення сердечника і зовнішньої оболонки; λ - довжина хвилі випромінювання.

Таким чином, макровигинання співвідносять з деяким певним малим радіусом. Виробник кабелю повинен вказати у специфікації мінімальний радіус вигину. Згинаючи ВОК сильніше, ніж допускається обмеженнями на радіус вигину, можна пошкодити кабель, навіть порвати волокна в кабелі. Це може викликати суттєве збільшення загасання волокна.

Втрати на макровигинаннях можна оцінити за такою формулою:

$$\alpha_{макро} = 10 \lg \left\{ 1 - \frac{U + 2}{2U\Delta} \left[\frac{2a}{R} + \left(\frac{0.16\lambda}{R} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\}, \quad (2.3)$$

де R - радіус макровигинання; a - радіус серцевини волокна; λ - довжина хвилі; U - показник ступеня функції, що описує профіль коефіцієнта

заломлення:

$$n_r = n_0 \cdot \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^U \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

де n_0 – показник заломлення у центрі волокна.

Вид макровигинання представлений рис. 2.8.



Рис. 2.8. Макровигинання ОВ

Втрати, які виникають при згинанні ОВ, можна розділити на: втрати при переході від прямого волокна до вигнутого і назад, втрати безпосередньо на згинанні. Втрати в місці з'єднання прямого і вигнутого волокон пояснюються зсувом центру модової плями в вигнутому волокні щодо осі волокна на деяку величину, що залежить від радіусу вигинання, тому моди виявляються зміщеними одна відносно одної, і потужність моди прямої ділянки волокна передається моді вигнутої частково. Частина потужності, що не передалася, перетворюється на моди оболонки і втрачається. Втрати такого типу залежать від радіусу вигинання ОВ.

Мода випромінюється в оболонку, і зрештою губиться. Цей вид втрат залежить як від радіусу згину, так і від кількості витків.

Вигинання викликають збільшення коефіцієнтів зв'язку між модами, збільшують зв'язок мод і поля випромінювання, а також змінюють модовий розподіл; все це призводить до додаткових втрат в ОВ.

При згинанні ОВ збільшується еліптичність сердцевини: в одній площині сердцевина стискається, в іншій розтягується.

Тому зростає поляризаційно-модова дисперсія, що призводить до відмінності швидкостей поширення двох перпендикулярних взаємно поляризаційних складових основної моди. Причиною такого зростання також є розбіжність геометричних центрів сердечника а також оболонки.

Зміни геометрії волокна, що призводять до збільшення поляризаційно-модової дисперсії, представлені на рис. 2.9.

Крім вигинів слід виділити такий вид механічного впливу, як роздавлююче навантаження. Даний тип навантаження характерний для оптичних кабелів, які прокладені у землі чи під водою. Такий тип навантаження впливає як на величину згасання, так і на величину поляризаційно-модової дисперсії.

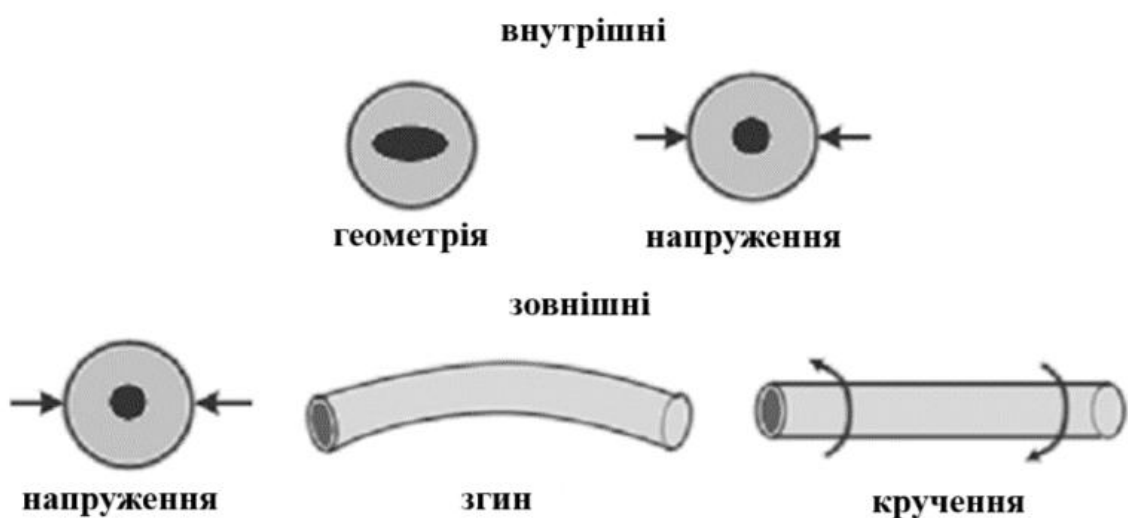


Рис. 2.9. Причини виникнення поляризаційно-модової дисперсії в ОВ

Ще один вид навантаження - розтягуючий. Такий тип впливу впливає на ОК, що підвішаний на опорах ЛЕП чи залізниць (у процесі експлуатації).

Розтягуюче навантаження може виникати безпосередньо при створенні ліній зв'язку: при укладанні кабелю кабелеукладачем, при укладанні в кабельну каналізацію. Навантаження такого роду виникає на початку руху кабелеукладача, ривках тракторів, поворотах, підйомах. При зтягуванні в кабельну каналізацію, додане зусилля не повинно перевищувати допустимого (для використовуваного типу кабелю) розтягуючого зусилля.

Тривалий вплив розтягуючого навантаження стає причиною мікротріщин та обривів ОВ.

Слід навести експеримент із вимірювання відносного подовження оптичного волокна. Цей експеримент проводився на установці компанії SWISSCAB, шляхом створення навантаження та утримання його протягом деякого періоду часу. За цей час структура волокна стабілізується (досягає стану рівноваги), після чого навантаження збільшується та утримується знову. Залежність, отримана за результатами експериментів, представлена на рис. 2.10.

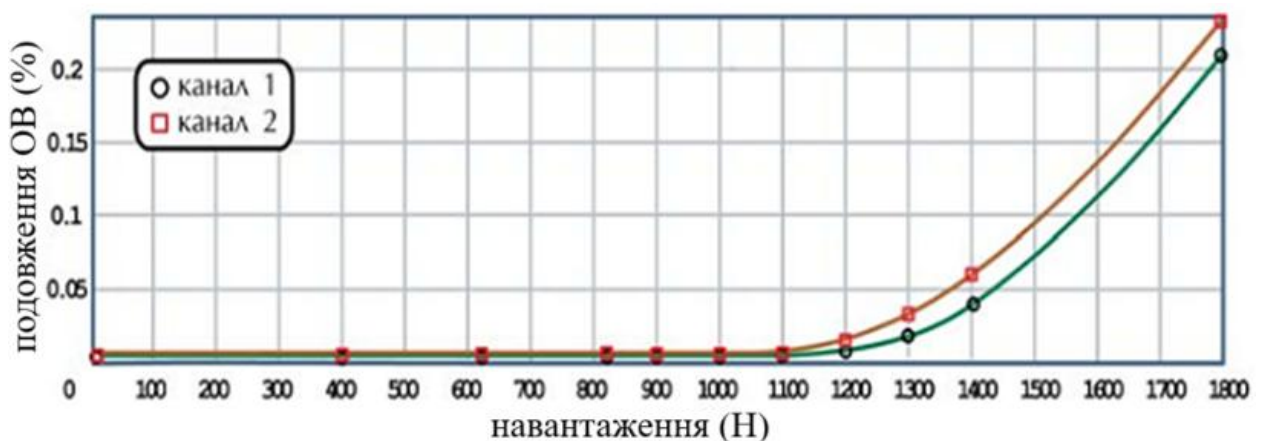


Рис. 2.10. Залежність подовження волокна від навантаження кабелю

Проаналізувавши графіки можна сказати, що подовження волокна починає різко збільшуватися після досягнення навантаженням значення 1100

Н, тобто, починаючи з цього значення, з'являється ймовірність виникнення мікротріщин.

Також відомий експеримент, спрямований на вивчення залежності величини поляризаційно-модової дисперсії від відносного видовження. У процесі експерименту досліджувалася ділянка ОВ довжиною 1,5 м. Графік з результатами експериментів представлений на рис. 2.11.

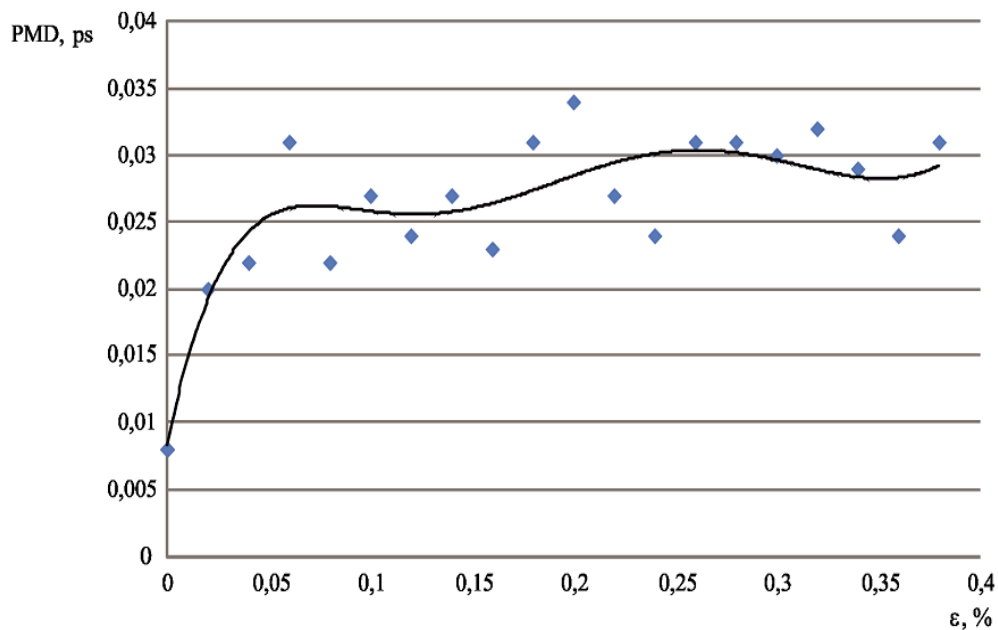


Рис. 2.11. Графік залежності поляризаційно-модової дисперсії від відносного видовження

З графіка видно, що значення поляризаційно-модової дисперсії зі зростанням величини відносного видовження загалом збільшується, проте чіткої залежності немає.

2.3.2 Небезпека та наслідки механічних впливів

2.3.2.1 Загасання

Механічні дії різних типів є причиною зростання величини загасання в ОВ. Загасання залежить від параметрів, умов та типу впливу.

Механічні впливи є однією з причин руйнування складових ОК та волокна зокрема. Руйнування захисних оболонок кабелю призводить до збільшення вразливості ОВ, стає причиною проникнення вологи та більш

агресивного впливу температур.

Впливи такого типу, за відсутності необхідних захисних заходів, призводять до швидкого скорочення терміну експлуатації ОК, а значить до додаткових матеріальних витрат та подорожчання лінії в цілому.

Тривалі механічні впливи стають причиною появи мікротріщин, як наслідок тріщин і розривів ОВ.

2.3.2.2 Поляризаційно-модова дисперсія

Збільшення поляризайонно-модової дисперсії виникає внаслідок механічної деформації ОВ.

Величина коефіцієнта поляризаційно-модової дисперсії може бути визначена за такою формулою:

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{K}{r^2}, \quad (2.5)$$

де K - коефіцієнт пропорційності, що має значення від 200 до 3500 $\frac{\text{пс} \times \text{мм}^2}{\sqrt{\text{км}}}$;

r - радіус вигинання, значення якого представлені в таблиці 2.2.

Коефіцієнт пропорційності слід прийняти максимальним.

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{3500}{15^2} = 15,556 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{3500}{13^2} = 20,71 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{3500}{11^2} = 28,926 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{3500}{9^2} = 43,21 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{3500}{7^2} = 71,429 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{3500}{5^2} = 140 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

$$K_{\text{ПМД}} = \frac{3500}{3^2} = 388,889 \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

Обчислені значення зведено до таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Результати розрахунків

Радіус вигинання ОВ, мм	Коефіцієнт поляризаційно-модової дисперсії, $\frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$
15	15,556
13	20,71
11	28,926
9	43,21
7	71,429
5	140
3	388,889

Отримані результати показують, що коефіцієнт поляризаційно-модової дисперсії збільшується із зменшенням радіусу вигинання.

2.4 Боротьба з механічними впливами

2.4.1 Стандарти

Стандарти у сфері телекомунікацій розробляються для організації узгодженої роботи мереж зв'язку.

Для оптичних волокон та кабелів існують стандарти серії G.650-659,

розроблені міжнародним союзом електрозв'язку.

Рекомендація G.652 описує одномодове ОВ з довжиною хвилі нульової дисперсії близько 1310 нм, оптимізоване для роботи на цій довжині хвилі. Рекомендація включає чотири типи волокон: А, В, С, D. Основні параметри представлені у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Параметри ОВ G.652

Параметр	Клас волокна			
	А	В	С	D
Втрати на макрозгині (30 мм, 100 витків), дБ	0,1 при 1550 нм	0,1 при 1625 нм	0,1 при 1625 нм	0,1 при 1625 нм
Перевірочне напруження, гПа	0,69	0,69	0,69	0,69
Коефіцієнт PMD, пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,5	0,20	0,5	0,20
Коефіцієнт згасання 1310 нм, дБ/км	0,5	0,4	0,4	0,4
Коефіцієнт згасання 1550 нм, дБ/км	0,4	0,35	0,3	0,3

Рекомендація G.653 характеризує ОВ зі зсувом дисперсії, включає два типи волокон: А, В. Основні параметри, важливі для вивчення питання зовнішніх впливів, представлені у таблиці 2.3.

Оптичне волокно рекомендації G.657 – нечутливе до вигинів, двох класів (А, В). Волокна, що відповідають цій рекомендації, призначені в основному для використання всередині приміщень. ОВ класу А є підмножиною волокон рекомендації G.652 D, має подібні характеристики передачі та з'єднання. Основне удосконалення – покращені характеристики втрат на згині. Волокна категорії В мають параметри, відмінні від волокон рекомендації G.652, допускають дуже малі радіуси вигинів. Основні

параметри ОВ рекомендації G.657 представлені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.3

Параметри ОВ G.653

Параметр	Клас волокна	
	А	В
Втрати на макрозгині (30 мм, 100 витків), дБ	0,5 при 1550 нм	0,1 при 1550 нм
Перевірочне напруження, гПа	0,69	0,69
Коефіцієнт PMD, пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,5	0,20
Коефіцієнт згасання 1550 нм, дБ/км	0,35	0,35

Таблиця 2.4

Параметри ОВ G.657

Параметр	Клас волокна	
	А	В
Втрати на макрозгині (15 мм, 10 витків), дБ	0,25 при 1550 нм	0,03 при 1550 нм
Перевірочне напруження, гПа	0,69	0,69
Коефіцієнт PMD, пс/ $\sqrt{\text{км}}$	0,2	Немає даних
Коефіцієнт згасання 1310 нм, дБ/км	0,4	0,5
Коефіцієнт згасання 1550 нм, дБ/км	0,3	0,3

Способи перевірки ОК на стійкість до механічних пошкоджень нормуються.

Вимоги до конструкції оптичного кабелю наведені в окремому стандарті. Відповідно до цього стандарту оптичний кабель може складатися з наступних елементів: оптичне волокно, оптичні модулі (з додатковими силовими елементами, із заповненням), профільоване осердя, проміжні оболонки, зовнішня оболонка, захисна оболонка, захисні покриття. Конкретний набір елементів визначається технічними вказівками, маркою

ОК, вимогами замовника.

Зусилля, що додається до кабелю при його прокладці в кабельну каналізацію нормується, для запобігання негативному впливу на параметри кабелю та ОВ. Допустиме зусилля затягування залежить від: маси кабелю, коефіцієнта тертя (зовнішньої оболонки кабелю та каналу трубопроводу), розташування кабелів у трубопроводі, наявності на трасі поворотів та різниць рівнів. Використання спеціального мастила дозволяє збільшити довжину кабелю, що затягується за кінець у телефонну каналізацію з поліетилену без порушення фізичних та оптичних характеристик ОВ.

2.4.2 Етап виробництва

Дотримання правил технології виробництва важливе для якісного та тривалого функціонування ОВ.

Міцність ОВ визначається умовами отримання опорних труб, технологією виготовлення заготовок, залежить від технологічних параметрів витягування волокна (температури, натягу, концентрації зважених частинок у високотемпературній зоні).

Руйнування ОВ починається, часто, з поверхні, отже оболонка має бути якомога міцнішою.

Для забезпечення міцності, в методі модифікованого парофазного хімічного осадження (MCVD) використовуються труби з синтетичного кварцового скла, що містять меншу кількість мікродфектів, ніж труби з природної сировини.

Вплив дефектів оболонки на міцність ОВ знижується двома способами: нанесенням на заготовку шару особливо чистого кварцового скла, нанесенням тонкого шару легovanого кварцового скла (з меншою в'язкістю або коефіцієнтом температурного розширення). Обробка дозволяє збільшити довговічність низькоміцного стану у 10-100 разів.

Міцність волокна збільшує первинне покриття, що складається з двох шарів акрилату. Внутрішній шар – більш м'який (гелеподібний), зовнішній – твердий.

Після закінчення процесу виготовлення (після нанесення первинного покриття та вимірювання діаметра) проводиться контрольне випробування на наявність пошкоджень в ОВ: протягом декількох секунд волокно піддається впливу розтягу чого зусилля.

2.4.3 Типи ОВ та ОК

ОВ та ОК повинні відповідати існуючим стандартам.

Компанії-виробники розробляють власні типи волокон із покращеними характеристиками, що відповідають стандартам.

Компанією Corning розроблені оптичні волокна з покращеними показниками згасання, стійкістю до згинів. Основні параметри ОВ представлені таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Параметри ОВ Corning

Марка ОВ	Параметр				
	Згасання (1310 нм), дБ/км	Згасання (1550 нм), дБ/км	Приріст згасання при згинанні (1550 нм), дБ/км	ПМД, пс/ $\sqrt{\text{км}}$	Натяг, ГПа
Corning ClearCurve XB	0,33-0,35	0,19-0,20	0,50 (10 мм, 1 виток)	0,1	0,7
Corning ClearCurve LBL	0,33-0,35	0,19-0,20	0,4 (7,5 мм, 1 виток)	0,2	0,7
Corning SMF-28 Ultra	0,32	0,18	0,50 (10 мм, 1 виток)	0,1	0,7
Corning SMF-28 ULL	0,28-0,31	0,17-0,18	0,1 (32 мм, 1 виток)	0,1	0,7

Одномодове ОВ марки Corning ClearCurve XB має покращені згинальні характеристики (порівняно зі стандартним одномодовим волокном), перевершує вимоги рекомендації G.657 A до збільшення загасання на згині, повністю задовольняє вимоги рекомендації G.652 D.

Одномодове волокно марки Corning ClearCurve LBL відповідає вимогам рекомендацій G.657A,B,G.652D. Має кращі згинальні характеристики.

Corning SMF-28Ultra – ОВ, що має низькі втрати та покращені характеристики при вигинаннях, характеристики цього волокна кращі, ніж у рекомендації G.657 A. Волокно цього типу має кращі характеристики, ніж ОВ

попередніх розробок.

ОВ Corning SMF-28e+ LL відповідає рекомендації G.652.D, має кращі характеристики, ніж інші волокна, що відповідають вимогам цієї рекомендації.

Corning SMF-28ULL – волокно, що має найменші втрати серед усіх одномодових волокон (компанії «Corning») наземних мереж зв'язку, має низьку поляризаційно-модову дисперсію. Характеристики цього волокна дозволяють збільшити довжину ліній зв'язку, зменшити кількість підсилювальних ділянок.

Компанією Sumitomo розроблено кілька типів одномодових ОВ із покращеними характеристиками.

Волокно PureAccess – ОВ нечутливе до вигинів, відповідає вимогам рекомендацій G.652 D, G.657 A, застосовується при побудові мереж доступу.

PureAccess-R5 – ОВ, стійке до вигинів, навантажень, скручування.

Основні параметри представлених волокон вказані у таблиці 2.6.

Конструктивні елементи ОК забезпечують захист ОВ від зовнішніх дій.

Таблиця 2.6

Параметри ОВ Sumitomo

Марка	Параметр			
	Згасання (1310 нм), дБ/км	Згасання (1550 нм), дБ/км	Приріст згасання при згинанні (1550 нм), дБ/км	ПМД, пс/ $\sqrt{\text{км}}$
PureAccess	0,35	0,21	0,5	0,2
PureAccess-R5	0,40	0,25	0,15	Немає даних

Кабелі різних виробників мають відмінну конструкцію та маркування, але всі можуть бути розділені на конкретні групи (наприклад, за призначенням та місцем прокладки).

ОК – сукупність кількох рівнів захисту ОВ.

Наведені типи ОК, волокон та нормативних документів показують, що

негативні наслідки зовнішніх механічних впливів на ОВ можуть бути зменшені тією чи іншою мірою, отже забезпечують якісну роботу мереж зв'язку.

2.5 Зовнішні електромагнітні впливи

2.5.1 Види зовнішніх електромагнітних впливів

Спочатку передбачалося, що ОК не схильні до впливу сильних зовнішніх електромагнітних полів, що виникають при ударах блискавки або поблизу високовольтних ЛЕП (з металевим екраном або оболонкою), так і щодо кабелів без металу в конструкції (чисто діелектричних).

ОК схильні до впливу блискавок і так званої електротермічної деградації.

В основному ОК, прокладені під землею, схильні до впливу блискавок, а до електротермічної деградації - підвішані на опорах ЛЕП і залізниць.

Під час підвішування К на опорах контактної мережі виникає небезпека виникнення сухого дугового розряду, що може призвести до пошкодження кабелю.

Блискавки впливають на ОК через його металеві складові, тобто під впливом блискавки в металевих складових кабелю виникає наведена напруга.

ОК мають у своєму складі металеві елементи. Наявність небезпечних напруг на таких елементах призводить до пошкодження ОВ, що пробивається тільки на частині довжини, що має заземлення у цих точках кабеля, прокладеного під землею.

Грозивий розряд потрапляє до кабеля, пробиваючи поліетиленову оболонку або шляхом індукції імпульсів по землі та по колу "оболонка - земля" між металевими елементами ОК і землею виникає напруга, амплітуда якої досягає декількох тисяч вольт. Амплітуда напруги залежить від двох параметрів:

- електричний опір оболонки;

- питомий опір навколишньої землі.

Великий струм імпульсу блискавки (для пробою) зменшується в міру поширення вздовж броні, тому що частково йде в землю; на деякій відстані слабшає настільки, що оболонка кабелю не пробивається.

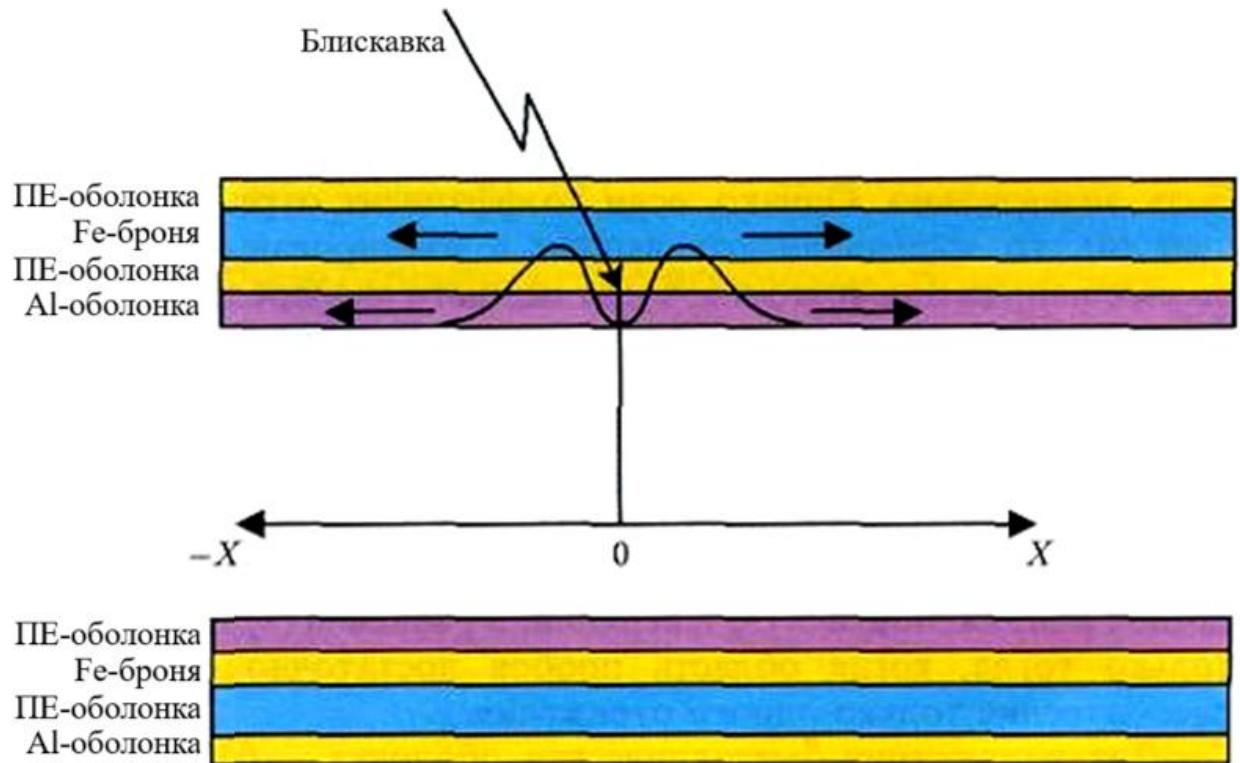


Рис. 2.12. Модель розповсюдження струму

Хвильовий опір пробитої зони значно відрізняється від ізолюваної, коефіцієнт відбиття близький до одиниці. Коефіцієнт загасання для ізолюваної зони малий, тому напруга «металева оболонка – броня», прикладена до ізолюваної частини.

Залежність величин струму та напруги представлена на рис. 2.13.

На довжині кабелю близько 100 м відбита хвиля майже збігається по фазі з вихідною, максимальне значення коефіцієнта відбиття може дорівнювати одиниці, що призводить до збільшення напруги. Зі збільшенням довжини ефект від впливу хвилі, що відбивається, зменшується.

Чим менша відстань між точками пробойів, тим сильніше позначається

ефект відбивання на збільшенні амплітудного значення напруги в колі «металеві оболонки-броя».

При ударі блискавки поблизу траси прокладання підземного ОК частина струму блискавки (весь струм) може потрапити у металеву оболонку; між точкою удару блискавки та кабелем виникає дуговий розряд; волога, що міститься в об'ємі каналу розряду, випаровується; пари і гази поблизу розряду створюють високий тиск, тому оболонка кабелю може бути зім'ята ще до попадання блискавки. При протіканні струму блискавки металеву оболонку кабелю між оболонкою і землею виникає напруга, яка може досягати декількох тисяч вольт, що стає причиною пробоя зовнішньої оболонки кабелю, ізоляції між металевими складовими.

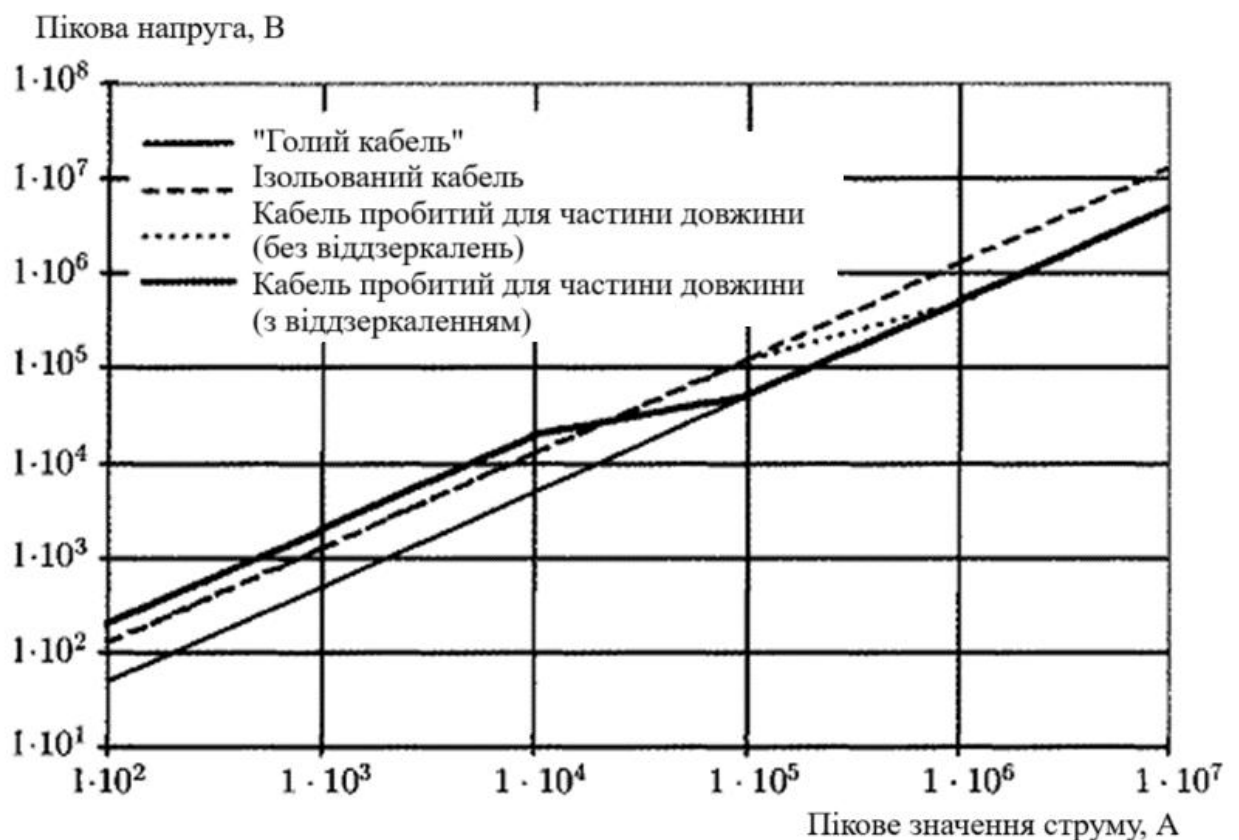


Рис. 2.13. Залежність напруги від струму для різних станів кабелю

Пошкодження в повітряному ОК, підвішаному на дерев'яних або металевих опорах, також можливі, якщо метал присутній в серцевині або в

оболонці кабеля. Підвісні ОК, на відміну від підземних, більш відкриті до впливу зовнішніх полів, тому в їх металевих елементах можливі наведення ЕРС та струмів, а отже, пробої ізоляційних покриттів. Струм блискавки в оболонці може викликати пробій між оболонкою та серцевиною. Руйнування ОВ можливе, якщо волокна знаходяться поблизу або на шдяху дуги або іскрового пробою. Частота прямих ударів блискавки в повітряний кабель залежить від щільності влучань блискавки на квадратний кілометр на рік у цій місцевості, висоти та довжини лінії.

Коли відбувається удар блискавки з великою амплітудою струму в повітряний кабель, оболонка якого не з'єднана із землею, значна частина струму блискавки (J) утворює дугу (перекриття) від металевої оболонки по поверхні опори або ізолятора до землі. Якщо металева оболонка повітряного ОК у певних місцях заземлена, виникнення пошкоджень залежить від двох величин:

1. відстані між заземленими точками;
2. величини опорів заземлень (рівень грозостійкості лінії).

При малих відстанях між заземленнями (близько 100 м) та низькому опоріві заземлення (менше 20 Ом) відбита від заземлення негативна хвиля гасить потенціал на оболонці кабелю. Якщо відстань між заземленнями велика (понад 300 м) і опір заземлення також великий (близько 100 Ом), то відбита від заземлення хвиля не встигає погасити зростання потенціалу на оболонці і відбувається пробій всередині ділянки між заземленнями.

Сильні електромагнітні поля, що виникають при ударах блискавки в землю поблизу кабельної лінії, викликають поворот площини світлової поляризації світла, що поширюється по ній. Тобто є причиною збільшення поляризаційно-модової дисперсії.

Зміна площини світлової поляризації в ОВ може призвести до подвійного променезаломлення та виникнення двох ортогональних складових хвилі. Кожна зі складових поширюватиметься незалежно, початкова енергія сигналу розподілиться між ними.

Якщо удар блискавки відбувається поблизу прокладеного у землі діелектричного ОК, то в волокнах кабелю може виникнути ефект Керра, тобто повертання площини світлової поляризації в поперечному електричному полі. Одноразова дія блискавки в одній точці при середніх умовах викликає порівняно невеликий ефект.

При впливі електромагнітного поля на ОВ відбувається взаємодія світла в волокні з зовнішнім полем, в результаті чого змінюється площина поляризації світлової хвилі, яка повертається на деякий кут, що залежить від величини поля. Удар блискавки в землю створює навколо точки удару потужні електричні та магнітні поля. Поворот площини світлової поляризації відбувається при взаємодії поля хвилі у волокні із зовнішніми поперечним електричним та поздовжнім магнітним полями. При ударі блискавки в землю величина електричного поля може досягати сотень кіловольт на метр, а поворот площини поляризації пропорційний квадрату величини поля. Кут повороту залежить від таких характеристик:

- амплітуди струму блискавки;
- питомого опору землі;
- глибини прокладання кабелю;
- відстані між кабелем та точкою удару блискавки.

При підсушуванні поверхні ОК волога випаровується (нерівномірно), що призводить до місцевого збільшення опору, причому щільність струму на інших ділянках кола збільшується, ці області прискорено нагріваються і утворюють підсушену кільцеву зону з підвищеним опором. Падіння напруги на цій ділянці збільшується до тих пір, поки не відбувається пробій, це призводить до утворення часткової електричної дуги, що перекриває повітряний проміжок завдовжки кілька міліметрів.

На величину напруженості дугових розрядів впливає ступінь забрудненості, інтенсивність зволоження, тобто питома провідність поверхні.

2.5.2 Небезпека та наслідки електромагнітних впливів

2.5.2.1 Загасання

Грозові розряди впливають на оптокабель з металевими деталями та без металевих елементів.

Наслідками такого впливу для оптокабеля з металевими деталями, що прокладені в землі, стають: пошкодження зовнішньої оболонки кабелю, ізоляції між металевими складовими. Внаслідок пошкоджень оболонка такого кабелю перестає виконувати свої функції у повному обсязі. Такі ушкодження призводять до поступового проникнення вологи, елементів ґрунту. Це стає причиною збільшення коефіцієнта загасання, що знижує ефективність роботи кабелю в мережі.

Підвішані на опорах ЛЕП ОК з вологою та забрудненою поверхнею схильні до поверхневого пробою, цей процес залишає сліди на поверхні оболонки, викликає розплавлення, деформацію, руйнування оболонки ОК та інших його елементів.

Звідси випливає, що поверхневий пробій призводить до механічних пошкоджень як ОК, так і ОВ.

У разі виникнення дуги і протіканні струму плавиться оболонка, поверхня ОК нагрівається.

2.5.2.2 Поляризаційно-модова дисперсія

Причиною повороту поверхні поляризації світла є вплив блискавок на діелектричні кабелі, прокладені в землі. Кут повороту визначається за формулою:

$$\varphi = \frac{3}{16} \times K \times \frac{(I \times p)^2}{(a^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (3.1)$$

де K - Постійна Керра;

I – амплітуда струму блискавки;

a – відстань до точки удару блискавки;

h – глибина прокладання кабелю.

ρ – питомий опір землі;

$$\varphi = \frac{3}{16} \times 0,402 \times 10^{-13} \times \frac{(50 \times 1000)^2}{(10^2 + 1^2)^{\frac{3}{2}}} = 1 \text{ градус}$$

В таблиці 2.7 представлені випадки перевищення кута поляризації за грозовий сезон.

Таблиця 2.7

Кількість випадків перевищення кута поляризації за грозовий сезон

Питомий опір землі, Омхм	Кут поляризації, градус					
	5	10	30	45	90	180
100	0,37	0,29	0,20	0,18	0,14	0,11
200	0,58	0,46	0,32	0,28	0,22	0,18
400	0,92	0,73	0,51	0,44	0,35	0,28
1000	1,7	1,35	0,94	0,82	0,65	0,52
2000	2,7	2,15	1,49	1,3	1,03	0,82
5000	4,97	3,96	2,74	2,4	1,9	1,51

З таблиці видно, що, наприклад, поворот площини поляризації на 45 градусів при питомому опорі 100 Ом м здійснюється приблизно раз на 5 років.

Тобто залежно від типу ґрунту схильність до впливу грозових розрядів буде більше або менше.

Грозодіяльність і щільність ударів у землю в деяких місцевостях - наприклад, у південних районах країни та передгір'ях - може значно (у кілька разів) перевищувати прийняті під час розрахунку таблиці величини, і тоді кількість випадків повороту площини поляризації за грозовий сезон відповідно зростає. Це не призводить до пошкодження кабелю, але коефіцієнт помилок може суттєво збільшитись, особливо при великих швидкостях передачі.

Тривалість затримки та прослизання імпульсів при кожному такому випадку може досягати кількох пікосекунд.

2.5.3 Способи захисту від зовнішніх ЕМ впливів

2.5.3.1 Стандарти

Блискавкостійкість ОК залежить від механічної міцності кабелю, від теплових характеристик матеріалів, провідності металевих оболонок (бронепокриву), електричної міцності інших елементів кабелю.

Захист ОК від ударів блискавки може здійснюватися за допомогою: прокладання ОК з підвищеною блискавкостійкістю, прокладання повністю діелектричних кабелів, прокладання в землі паралельно до ОК захисних проводів. За допомогою захисних проводів перехоплюється розряд блискавки, що зменшує ймовірність пошкодження ОК.

Коефіцієнти захисної дії таких дротів вказані у таблиці 2.8. Коефіцієнти отримані при прокладанні проводів на глибині 0,4 метра та відстані від ОК рівному 0,5 метра. Наведено значення як одного, так двох проводів.

Таблиця 2.8

Коефіцієнти захисної дії

Питомий опір ґрунту, Ом/м	Коефіцієнт захисної дії				
	Одного дроту	Двох проводів, на відстані між проводами, м			
		0,4	1	2	4
100	0,03	0,02	0,002	0,001	0,40
300	0,18	0,15	0,06	0,03	0,32
500	0,25	0,21	0,10	0,06	0,19
700	0,34	0,28	0,16	0,09	0,13
1000	0,41	0,31	0,22	0,15	0,18
3000	0,63	0,54	0,48	0,41	0,23
5000	0,73	0,63	0,58	0,49	0,36
7000	0,78	0,69	0,63	0,55	0,44
10000	0,82	0,77	0,71	0,64	0,52

Якщо дерева, що окремо стоять, або інші об'єкти вище 6 метрів, розташовані недалеко від траси, то слід передбачати захист при відстані між кабелем і об'єктом менше відстаней, зазначених у таблиці 2.9.

Таблиця 2.9

Допустима відстань захисту

Питомий опір ґрунту, Ом/м	Найменша припустима відстань, м
До 100	5
Більше 100 до 1000	10
Більше 1000	15

2.5.3.2 Оптичні кабелі

Виділяють сім типів кабелів призначених для підвісу на опорах: у фазному проводі (ОКФП), навивний на фазу (ОКН(ФП)), приєднаний (ОКП), самонесучий (ОКСН) у грозозахисному тросі (ОКГТ), навивний на грозотрос (ОКН(ГТ)).

У структурі кабелю ОКГТ можна назвати дві складові: зовнішній одинарний (подвійний) повив, оптичний модуль. Застосовується сталевий дріт, плакований алюмінієм, для забезпечення стійкості до коротких замикань можуть використовуватися алюмінієві дроти. Комбінації різних дротів дозволяють досягти необхідних характеристик міцності.

Самонесучі діелектричні кабелі (ОКСН) при монтажі розташовуються, як правило, нижче за фазові проводи. При проектуванні ліній зв'язку з кабелем такого типу необхідно враховувати вплив наведених струмів і напруг, що виникають під дією фазових проводів. Застосування таких кабелів на лініях з напругою понад 110 кВ обмежене. Кабелі ОКСН мають низьку стійкість до дрібних пошкоджень.

Оптичний кабель типу ОКН навивається на наявний грозозахисний трос

або фазовий провід. Для кабелів такого типу характерні: мала маса та габарити, легкість прокладки, економічність.

2.6 Вплив температур

2.6.1 Суть температурного впливу

Температура довкілля впливає як на характеристики передачі сигналу в ОВ, так і на складові кабелю.

Дослідження тривалих впливів підвищених та низьких температур на пропускання світловодів з різними покриттями стимулюються як необхідністю подальшого вдосконалення технології виготовлення ОК, так і оцінки працездатності ОК в реальних умовах. Необхідно знати залежність передавальних характеристик (числова апертура та коефіцієнт загасання) від температури.

Під впливом температури в ОВ виникають термічні напруження через різні коефіцієнти термічного розширення ОВ і полімерної оболонки.

При експлуатації за умов низьких температур, через різниці коефіцієнтів термічного розширення різних частин кабелю спостерігається поздовжнє стискання ОВ.

Видавлювання волокна з оболонки в стикувальних муфтах відбувається за різниці в коефіцієнтах розширення, цей процес обумовлений механотермічною деструкцією полімеру.

На рис. 2.14 показано залежність числової апертури від температури. На рис. 2.15 показано залежність показника заломлення оболонки ОВ від оточуючої температури. Згідно з рис. 2.15 показник заломлення оболонки зростає при зниженні температури, тому, різке зростання показника заломлення оболонки призводить до зменшення перепаду між показниками заломлення сердечника та оболонки, а значить, числова апертура ОВ

зменшується. При температурі мінус 45 С ОВ втрачає свої світловедучі властивості, так як показники заломлення матеріалів стають дуже близькими за значенням.

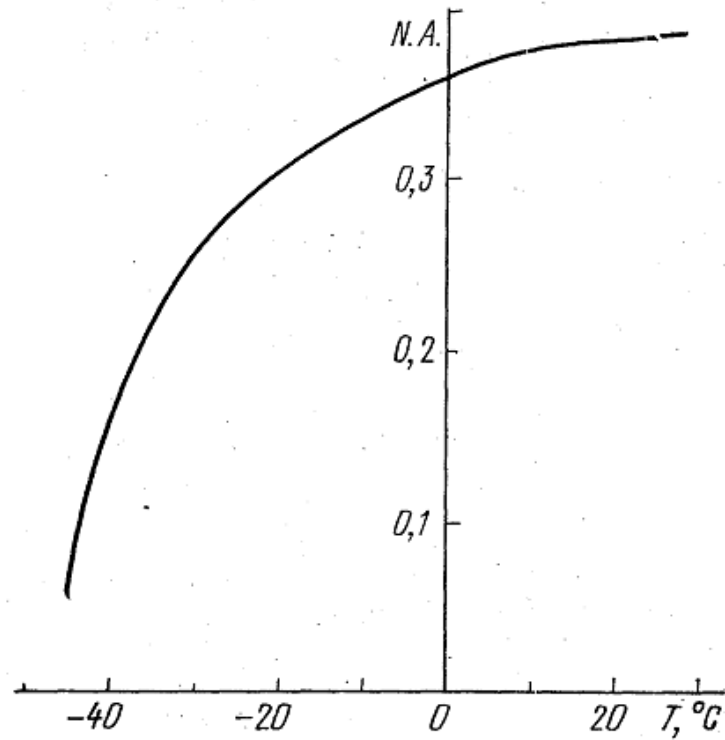


Рис. 2.14. Залежність числової апертури від температури

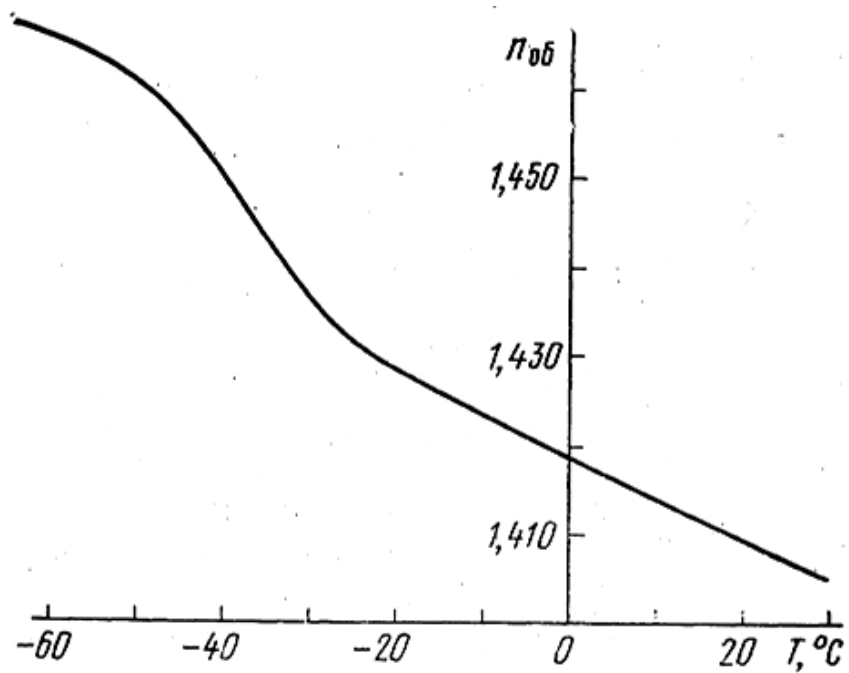


Рис. 2.15. Залежність показника заломлення оболонки від температури

Згідно з графіками на рис. 2.16 додаткові втрати слабо залежать від величини досліджуваного відрізка, отже, збільшення втрат при зниженні температури пов'язане переважно зі зменшенням вхідної апертури волокна. Втрати різко зростають за нормальної температури, близької до мінус 45°C.

ОК, підвішані на опорах, піддаються впливу прямих сонячних променів, а значить нагріванню. Відомі експерименти, спрямовані на дослідження залежності величини загасання ОВ та зварних з'єднань від високих температур. Результати досліджень наведено у таблиці 2.10.

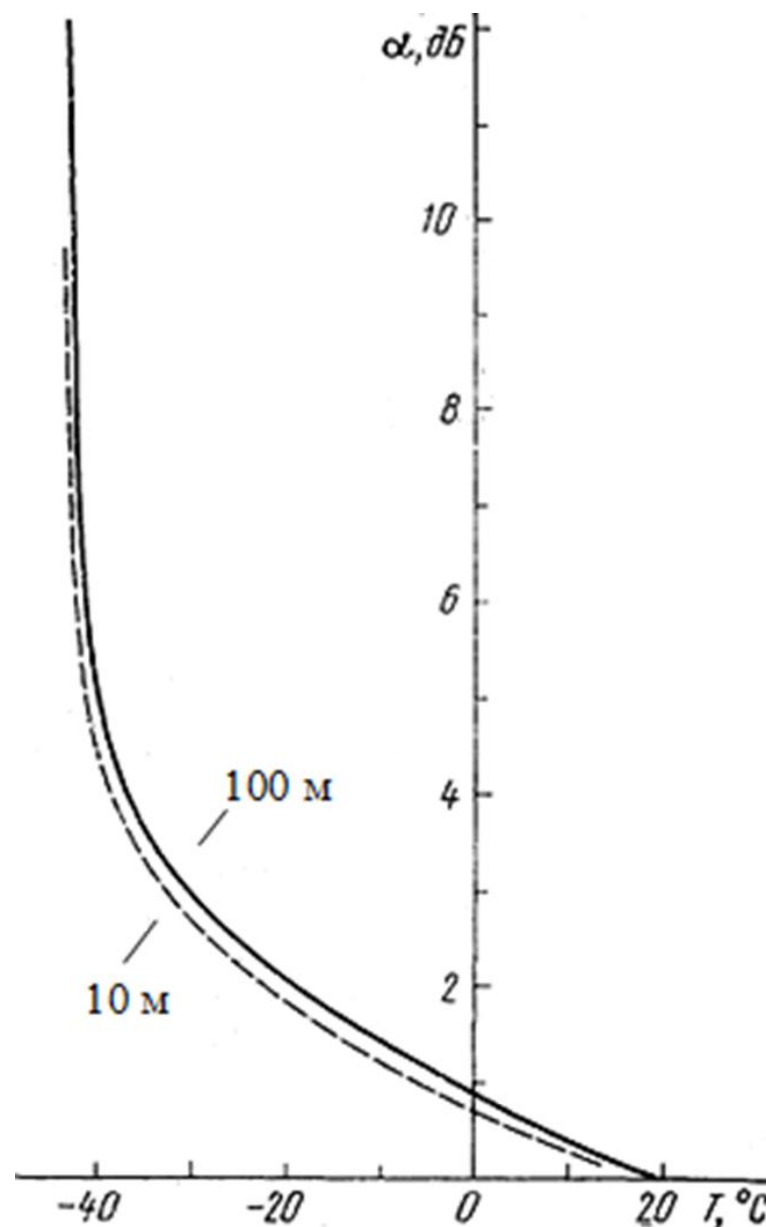


Рис. 2.16. Залежність додаткових втрат від температури

Таблиця 2.10

Вплив температури на загасання

Номер ОВ	Загасання при дії температури	
	На зварюванні, дБ	Кілометр, дБ/км
1	0,07	0,12
2	0,12	0,14
3	0,03	0,06
4	0,18	0,28
5	0,13	0,13
6	0,11	0,15
7	0,11	0,20
8	0,04	0,19

Дослідження проводили на 1550 нм. Результати експерименту, вказані в таблиці, підтверджують негативний вплив високих температур на загасання в ОВ.

На рис. 2.17 представлено залежність загасання від температури для трьох типів ОВ.

Для залежностей на рис. 2.17 надлишкова довжина ОВ в кабелі прийнята рівною від 0 до 0,1%.

ОВ марки AllWaveZWP – це одномодове ОВ, що відповідає рекомендації G.652 C/D. Волокно TrueWave RSLWP відповідає рекомендації G.655. ОВ марки AllWave FLEXZWP – одномодове ОВ, що відповідає рекомендації G.652 C/D, G.657 A.

При надмірній довжині ОВ в кабелі від 0,3 до 0,4% залежність коефіцієнта загасання від температури змінюється і стає такою, як показано на рис. 2.18.

З представлених графіків видно, що після 4-годинної витримки ОК при зниженій температурі, спостерігається загасання 0,05 дБ/км і більше.

Допустима знижена робоча температура ОК залежить від надлишкової довжини ОВ, типу ОВ, що застосовується. Найкращі показники має волокно марки AllWaveFLEXZWP.

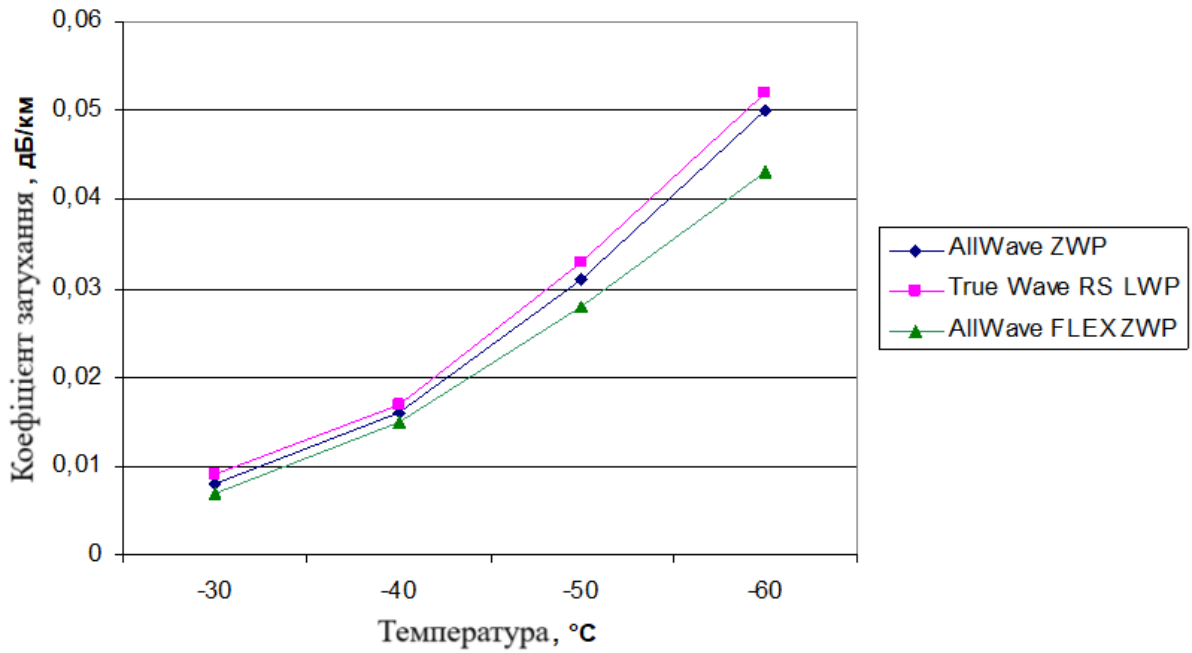


Рис. 2.17. Залежність коефіцієнта загасання від температури

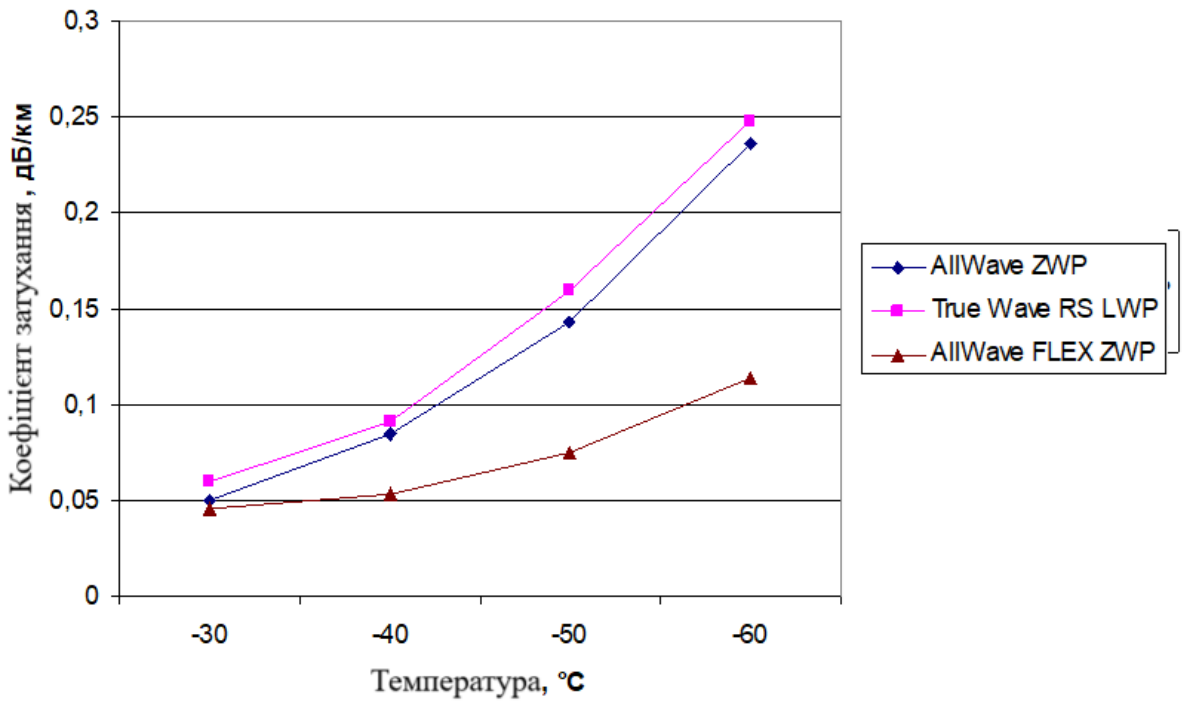


Рис. 2.18. Залежність коефіцієнта загасання від температури для трьох типів ВОЛОКОН

Поляризаційно-модова дисперсія так само, як і загасання залежить від зміни оточуючої температури.

Відомі експерименти, спрямовані на вивчення поведінки коефіцієнта поляризаційно-модової дисперсії при зміні оточуючої температури. Експерименти проводили з ОВ у полімерному захисному буфері. Для проведення дослідження витки ОВ були вільно підвішені на підтримуючу трубу, вид цієї конструкції представлений на рис. 2.19.



Рис. 2.19. ОВ із щільним буфером

При дослідженні використовувалася установка, що включає суперлюмінісцентний діод, оптичний спектральний аналізатор, персональний комп'ютер, контролер поляризації, поляризатор. Експеримент проводився з використанням внутрішньооб'єктового кабелю з ОВ, що відповідає вимогам рекомендації G.652 з буферним покриттям з полібутилентерефтоладу (PBT), до складу кабелю входить силовий елемент і оболонка, що не підтримує горіння. Кабель був підданий трьом температурним циклам (від мінус 20 до +60°C) з кроком 20°C на годину, час витримки становив 24 години (для повної стабілізації поляризаційно-модової дисперсії). Результати експериментів графічно представлені рис. 2.20.

На графіку видно, що мають місце великі зміни поляризаційно-модової

дисперсії між температурними циклами, великий вплив має температура при значенні мінус 20 С, малий – при +60 С

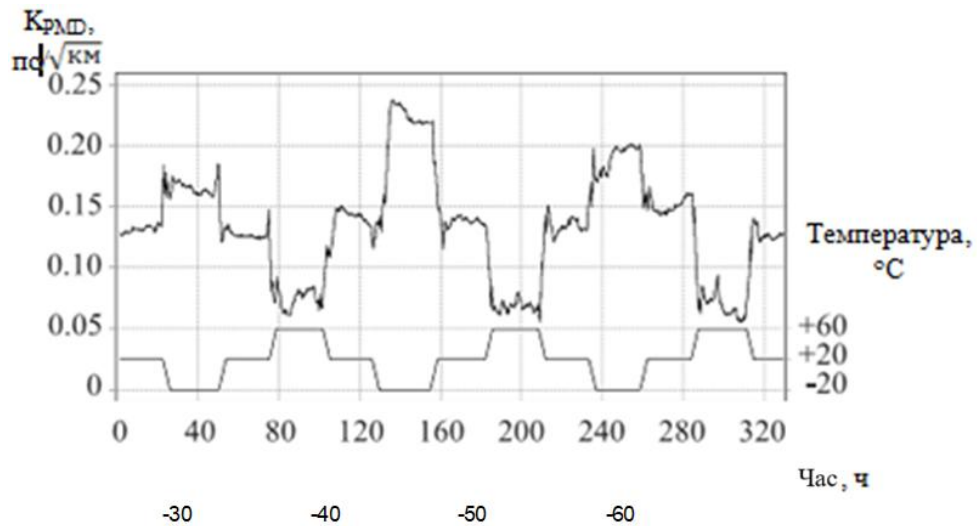


Рис. 2.20. Результати експериментів

Іншого виду дослідження було проведено з використанням оптичного модуля, що складається з 12 волокон, витягнутого з кабелю, вбудованого в грозозахисний трос (OPGW). Експерименти проводились у діапазоні робочих температур кабелю. Отримані результати представлені на рис. 2.21.

Найбільше значення поляризаційно-модової дисперсії спостерігається в областях граничних температур.

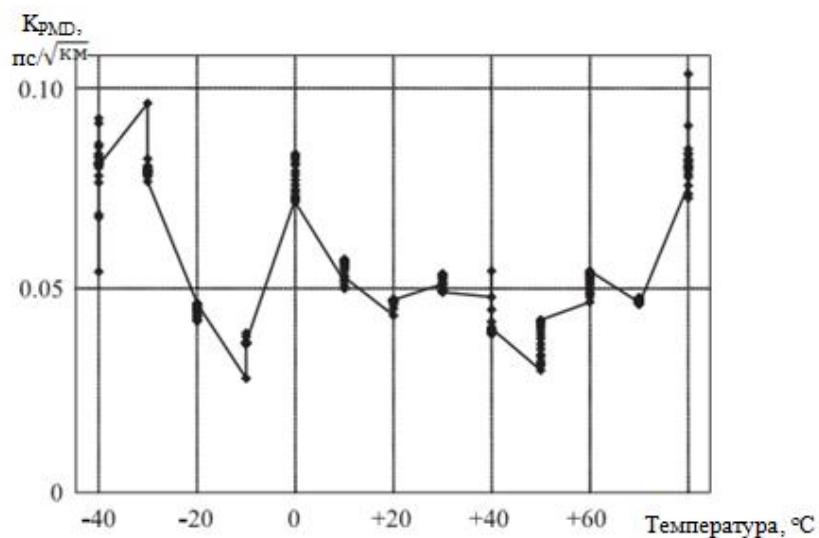


Рис. 2.21. Залежність поляризаційно-модової дисперсії від температури

2.6.2 Наслідки впливу температур

2.6.2.1 Загасання

Дослідження тривалих впливів підвищених та низьких температур на пропускання світловодів з різними покриттями стимулюються як необхідністю подальшого вдосконалення технології виготовлення ОК, так і для оцінки працездатності ОК у реальних умовах.

Під впливом температур різних знаків виникає здавлювання або розтягнення ОК, а значить і ОВ. В результаті змінюється форма волокна, з'являються додаткові втрати.

2.6.2.2 Поляризаційно-модова дисперсія

Через вплив різних температур на ОК відбувається здавлювання ОВ. ОК складається з матеріалів із відмінними один від одного коефіцієнтами температурного розширення. Чим більша різниця між цими коефіцієнтами, тим більше буде деформовано волокно.

Коефіцієнт поляризаційно-модової дисперсії може бути розрахований за такою формулою:

$$K_{PMD} = \frac{R}{c} \times \sqrt{\frac{h}{1000}} \times (\sigma_x - \sigma_y) \quad (2.6)$$

де c – швидкість світла у вакуумі;

R - коефіцієнт;

h – довжина зв'язку поляризованих мод, що дорівнює 10 м;

σ_x здавлювання вздовж осі X ;

σ_y здавлювання вздовж осі Y .

Нехай здавлювання вздовж осі X дорівнюватиме 3 МПа, вздовж осі Y - 0,3 МПа.

$$K_{PMD} = \frac{3,15 \times 10^{-6}}{3 \times 10^8} \times \sqrt{\frac{10}{1000}} \times (3 - 0,3) = 2,835 \times 10^{-3} \frac{\text{пс}}{\sqrt{\text{км}}}$$

2.6.3 Засоби захисту ОВ від температурних впливів

2.6.3.1 Оптичні волокна та кабелі

Коефіцієнт загасання ОВ визначається параметрами температурного циклу кабелю при експлуатації при різних температурних умовах. У документації на ОК вказується максимальне та мінімальне значення експлуатаційної температури, відносна зміна загасання в ОВ у цьому діапазоні температур не перевищує кількох десятих дБ/км. Виробниками ОВ та ОК розробляються марки з різними діапазонами експлуатаційних температур. Забезпечують захист ОВ покриття та оболонки.

Компанією Draka розроблене одномодове ОВ марки BendBright-XS. Експлуатаційний діапазон цього волокна від мінус 60 до +300⁰С. Можливість роботи у такому діапазоні забезпечується спеціальним поліамідним покриттям, нанесеним на ОВ.

2.7 Висновки до розділу 2

Проаналізовано фактори загасання сигналу в оптоволокну, зокрема механічні фактори, електромагнітні впливи, температурні впливи, вплив води, радіації, електротермічна деградація. Також проаналізовано фактори, що впливають на поляризаційно-модову дисперсію. Проведено функціональний аналіз механічних впливів на передавальні параметри оптичного волокна, зокрема мікровигинань та макровигинань, відносного видовження кабелю. Встановлено, що значення поляризаційно-модової дисперсії зі зростанням величини відносного видовження загалом збільшується, проте чіткої залежності немає. Також наведено основні функціональні залежності та розрахункові формули для врахування зазначених впливів.

РОЗДІЛ 3

НАУКОВО ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

3.1 Дослідження впливу вигинів на передавальні параметри оптоволокна

Дослідження впливу вигинів на передавальні параметри ОВ проводились для визначення степені впливу кількості витків на величину втрат, а також вплив радіусу згину.

В ході досліджень застосовувалась установка з котушками для намотування патчкордів, два патчкорди з одномодовим волокном, оптичний тестер. Використовувалися патчкорди з одномодовим волокном.

Спочатку був виміряний вихідний рівень потужності. Після цього послідовно намотувалися один, два, три витки. Для більшої точності кожне вимірювання рівня потужності при конкретній величині діаметра намотування і конкретній кількості витків проводилося тричі, перед вимірюванням контролювався вихідний рівень потужності. Контроль вихідного рівня потужності здійснювався так: намотаний на циліндр патчкорд розпрямлявся (без відключення від приладів), включалися джерело та приймач, фіксувалося отримане значення.

Величина втрат розраховувалася за такою формулою:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}{3} \quad (3.1)$$

де α_1 величина втрат для першого виміру;

α_2 величина втрат для другого виміру;

α_3 величина втрат для третього виміру;

α середнє арифметичне втрат.

Результати експериментів представлені у таблицях 3.1, 3.2, 3.3, а

значення втрат у таблицях 3.4, 3.5, 3.6.

Таблиця 3.1

Результати вимірювань для патчкорду №1 на довжині хвилі 1310 нм

Номер котушки, діаметр	Число витків	Порядковий номер					
		№1		№2		№3	
		Рвх	Рвих	Рвх	Рвих	Рвх	Рвих
№1 D=30	1	4,63	4,74	4,63	4,75	4,65	4,72
	2	4,62	4,83	4,63	4,78	4,65	4,79
	3	4,67	4,85	4,69	4,89	4,63	4,88
№2 D=26	1	4,65	4,97	4,65	4,87	4,62	4,98
	2	4,40	4,63	4,41	4,63	4,44	4,69
	3	4,41	4,63	4,45	4,69	4,41	4,65
№3 D=22	1	4,41	4,50	4,37	4,52	4,27	4,53
	2	4,32	4,55	4,40	4,75	4,42	4,66
	3	4,39	4,61	4,31	4,45	4,34	4,48
№4 D=18	1	4,55	4,76	4,51	4,80	4,56	4,78
	2	4,55	4,85	4,55	4,78	4,50	4,81
	3	4,46	4,78	4,41	4,75	4,56	4,96
№5 D=14	1	4,53	4,93	4,56	4,87	4,53	4,85
	2	4,55	5,03	4,52	5,09	4,52	5,05
	3	4,53	5,19	4,52	5,18	4,50	5,23
№6 D=10	1	4,50	5,56	4,52	5,71	4,52	5,76
	2	4,52	7,88	4,53	7,52	4,55	7,61
	3	4,53	9,34	4,53	9,64	4,53	9,58
№7 D=6	1	4,52	10,54	4,52	10,36	4,55	11,39
	2	4,51	26,85	4,55	24,62	4,50	25,84
	3	4,53	43,15	4,53	44,28	4,52	43,27

Таблиця 3.2

Результати вимірювань для патчкорду №1 на довжині хвилі 1550 нм

Номер котушки, діаметр	Число витків	Порядковий номер виміру					
		№1		№2		№3	
		Рвх	Рвих	Рвх	Рвих	Рвх	Рвих
№1 D=30	1	4,84	4,97	4,80	4,97	4,79	4,92
	2	4,79	4,95	4,78	4,96	4,83	4,98
	3	4,80	5,09	4,76	5,04	4,72	5,07
№2 D=26	1	4,69	5,13	4,70	5,02	4,70	5,10
	2	4,70	5,18	4,70	5,18	4,69	5,15
	3	4,72	5,24	4,74	5,32	4,71	5,41
№3 D=22	1	4,70	5,36	4,72	5,33	4,72	5,33
	2	4,70	5,43	4,72	5,48	4,69	5,49
	3	4,70	5,62	4,70	5,49	4,69	5,54
№4 D=18	1	4,71	5,82	4,71	5,84	4,72	5,83
	2	4,70	6,33	4,71	6,41	4,71	6,35
	3	4,71	6,96	4,72	7,03	4,71	7,02
№5 D=14	1	4,71	8,72	4,71	9,04	4,74	8,85
	2	4,72	13,34	4,71	13,45	4,70	13,38
	3	4,69	16,71	4,71	16,30	4,72	16,51
№6 D=10	1	4,71	19,58	4,70	19,02	4,71	19,28
	2	4,72	35,47	4,71	35,52	4,72	35,49
	3	4,71	50,7	4,69	50,9	4,69	50,8
№7 D=6	1	4,71	39,44	4,69	42,40	4,71	40,37
	2	4,71	<70				
	3						

□

Таблиця 3.3

Результати вимірювань для патчкорду №2 на довжині хвилі 1550 нм

Номер котушки, діаметр	Число витків	Порядковий номер виміру					
		№1		№2		№3	
		Рвх	Рвих	Рвх	Рвих	Рвх	Рвих
№1 D=30	1	-4,32	-4,34	-4,32	-4,34	-4,31	-4,37
	2	-4,32	-4,41	-4,28	-4,33	-4,29	-4,34
	3	-4,27	-4,34	-4,23	-4,29	-4,24	-4,32
№2 D=26	1	4,24	4,25	4,25	4,24	4,26	4,23
	2	4,26	4,45	4,25	4,26	4,25	4,27
	3	4,25	4,47	4,23	4,38	4,25	4,50
№3 D=22	1	4,24	4,46	4,25	4,35	4,25	4,42
	2	4,25	4,37	4,24	4,28	4,25	4,38
	3	4,24	4,60	4,25	4,65	4,24	4,63
№4 D=18	1	4,25	4,69	4,24	4,65	4,26	4,62
	2	4,26	5,11	4,24	5,06	4,25	5,07
	3	4,21	5,80	4,21	5,84	4,20	5,67
№5 D=14	1	4,31	5,45	4,31	5,52	4,31	5,43
	2	4,32	7,75	4,31	8,26	4,29	7,73
	3	4,31	10,32	4,29	10,41	4,33	9,74
№6 D=10	1	4,33	14,46	4,32	10,11	4,32	13,78
	2	4,31	25,83	4,33	29,80	4,33	23,25
	3	4,33	41,76	4,33	43,24	4,33	41,24
№7 D=6	1	4,32	25,39	4,33	35,09	4,33	35,64
	2	4,33	<70				
	3						

Таблиця 3.4

Значення загасань для патчкорду №1 на довжині хвилі 1310 нм

Номер котушки, діаметр	Число витків	Порядковий номер експерименту			α
		№1	№2	№3	
		α_1	α_2	α_3	
№1 D=30	1	0,11	0,12	0,07	0,1
	2	0,21	0,15	0,14	0,167
	3	0,16	0,2	0,25	0,203
№2 D=26	1	0,32	0,22	0,36	0,3
	2	0,23	0,22	0,25	0,233
	3	0,22	0,24	0,24	0,233
№3 D=22	1	0,09	0,15	0,26	0,167
	2	0,23	0,35	0,24	0,273
	3	0,22	0,14	0,14	0,167
№4 D=18	1	0,21	0,29	0,22	0,24
	2	0,3	0,23	0,31	0,28
	3	0,32	0,34	0,4	0,353
№5 D=14	1	0,4	0,31	0,32	0,343
	2	0,48	0,57	0,53	0,527
	3	0,66	0,66	0,73	0,683
№6 D=10	1	1,06	1,19	1,24	1,163
	2	3,36	2,99	3,06	3,137
	3	4,81	5,11	5,05	4,99
№7 D=6	1	6,02	5,84	6,84	6,233
	2	22,34	20,07	21,34	22,77
	3	38,62	39,75	38,75	39,04

Таблиця 3.5

Значення загасань для патчкорду №1 на довжині хвилі 1550 нм

Номер котушки, діаметр	Число витків	Порядковий номер експерименту			α
		№1	№2	№3	
		α_1	α_2	α_3	
№1 D=30	1	0,13	0,17	0,13	0,143
	2	0,16	0,18	0,15	0,163
	3	0,29	0,28	0,35	0,307
№2 D=26	1	0,44	0,32	0,4	0,387
	2	0,48	0,48	0,46	0,473
	3	0,52	0,58	0,7	0,6
№3 D=22	1	0,66	0,61	0,61	0,627
	2	0,73	0,76	0,8	0,763
	3	0,92	0,79	0,85	0,853
№4 D=18	1	1,11	1,13	1,11	1,117
	2	1,63	1,7	1,64	1,657
	3	2,25	2,31	2,31	2,29
№5 D=14	1	4,01	4,69	4,11	4,27
	2	8,62	8,74	8,68	8,68
	3	12,02	11,59	11,79	11,8
№6 D=10	1	14,87	14,32	14,57	14,587
	2	30,75	30,81	30,77	30,777
	3	45,99	46,21	46,11	46,103
№7 D=6	1	34,73	37,71	35,66	36,033
	2	<65,29			<65,29
	3				

Таблиця 3.6

Значення загасань для патчкорду №2 на довжині хвилі 1550 нм

Номер котушки, діаметр	Число витків	Порядковий номер			α
		№1	№2	№3	
		α_1	α_2	α_3	
№1 D=30	1	0,02	0,02	0,06	0,03
	2	0,09	0,05	0,05	0,063
	3	0,07	0,06	0,08	0,07
№2 D=26	1	0,01	0,01	0,03	0,003
	2	0,19	0,01	0,02	0,073
	3	0,22	0,15	0,25	0,207
№3 D=22	1	0,22	0,1	0,17	0,163
	2	0,12	0,04	0,13	0,097
	3	0,136	0,4	0,39	0,383
№4 D=18	1	0,44	0,41	0,36	0,403
	2	0,85	0,82	0,82	0,83
	3	1,59	1,63	1,47	1,563
№5 D=14	1	1,14	1,21	1,12	1,157
	2	3,43	3,95	3,44	3,607
	3	6,01	6,12	5,41	5,847
№6 D=10	1	10,13	5,79	9,46	8,46
	2	21,52	25,47	18,92	21,97
	3	37,43	38,91	36,91	37,75
№7 D=6	1	21,07	30,76	31,31	27,713
	2	<65,67			<65,67
	3				

За результатами вимірів були побудовані графіки, що представлені на рис. 3.1.

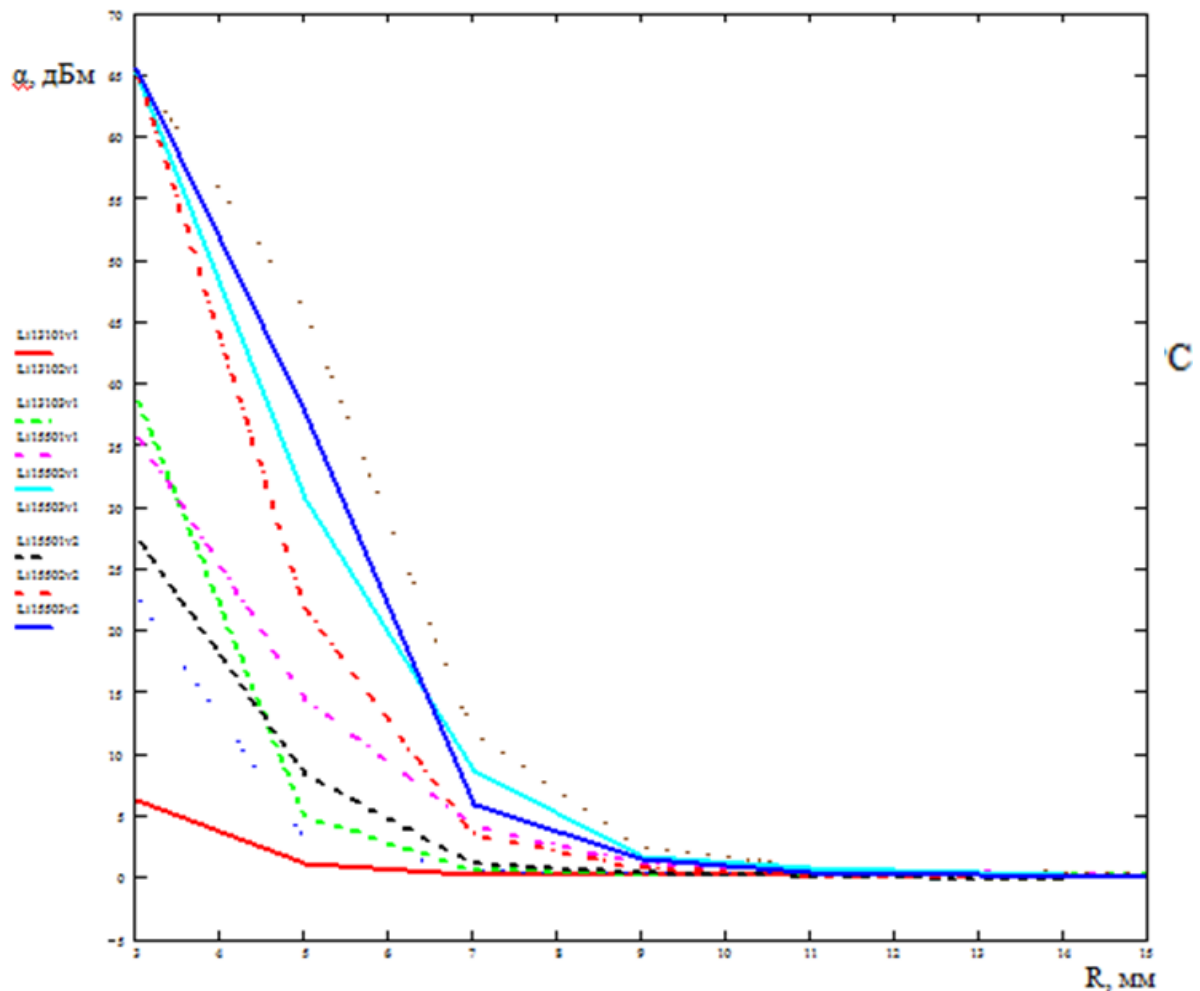


Рис. 3.1. Залежність збільшення втрат в оптичному волокні від радіусу вигину

Отримані значення та графіки підтверджують теоретичні припущення про збільшення втрат зі зростанням довжини хвилі, зі зменшенням радіусу вигину. Така залежність від довжини хвилі зумовлена тим, що при згинанні ОВ з її збільшенням частина випромінювання, що потрапляє в оболонку, стає більшою.

Графіки, отримані за результатами експериментів, можна оцінити з допомогою відповідних рівнянь. Ці рівняння зручно отримати за допомогою операції апроксимації за методом найменших квадратів.

Коефіцієнти рівняння прямої розраховуються за такими формулами:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \times \sum_{i=1}^n (X_i)^2 - \sum_{i=1}^n X_i \times \sum_{i=1}^n (X_i \times Y_i)}{n \times \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad (3.2)$$

де Y_i значення згасання, отримані експериментально;

X_i значення радіусу згину ОВ;

n кількість відліків на ділянці апроксимації.

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^n X_i \times Y_i - \sum_{i=1}^n X_i \times \sum_{i=1}^n Y_i}{n \times \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)^2} \quad (3.3)$$

Результати розрахунків зведено до таблиці 3.7.

Таблиця 3.7

Результати розрахунків

Кількість витків	a			b		
	1310 нм, патчкорд 1	1550 нм, патчкорд 2	1550 нм, патчкорд 3	1310 нм, патчкорд 1	1550 нм, патчкорд 2	1550 нм, патчкорд 3
1	-0,363	-2,495	-1,803	4,484	30,62	21,645
2	-1,319	-4,713	-4,359	15,785	57,814	52,422
3	-2,26	-5,554	-5,185	26,861	68,838	63,208

Отримані коефіцієнти дозволяють визначити функції та побудувати відповідні графіки. Графіки функцій представлені на рис. 3.2.

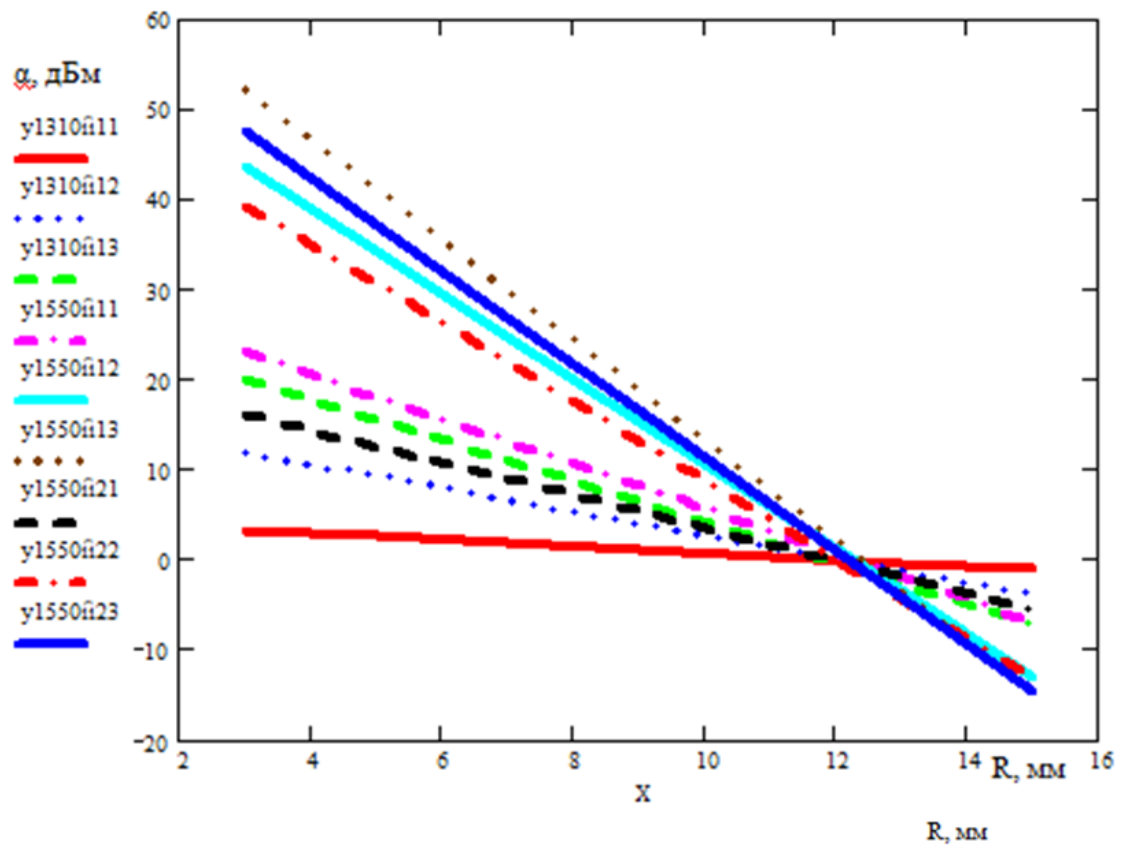


Рис. 3.2. Графіки функцій

3.2 Висновки до розділу 3

Наведено результати дослідження впливу вигинів на передавальні параметри оптоволокна. Вони проводились для визначення степені впливу кількості витків на величину втрат, а також вплив радіусу згину.

Спочатку визначався вихідний рівень потужності. Після цього послідовно намотувалися один, два, три витки оптоволокна. Контроль вихідного рівня потужності здійснювався так: намотаний на циліндр патчкорд розпрямлявся (без відключення від приладів), включалися джерело та приймач, фіксувалося отримане значення.

За результатами дослідження було побудовано графіки залежності втрат в оптичному волокні від радіусу вигину. Отримані графіки підтверджують теоретичні припущення про збільшення втрат зі зростанням довжини хвилі, зі зменшенням радіусу вигину.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Охорона праці

Електромагнітне випромінювання в оптичній області, що примикає з боку коротких хвиль до видимого світла і має довжину хвиль в діапазоні 200...400 нм, називають ультрафіолетовим випромінюванням (УФВ). Вплив його на людину оцінюють еритемною дією (почервоніння шкіри, що приводить через 48 годин до її пігментації - засмазі).

Проблема ультрафіолетового випромінювання як виробничого та екологічного чинника обумовлена широким використанням джерел постачання в народному господарстві, збільшенням рівнів сонячного випромінювання у зв'язку зі зменшенням озонового шару, зростанням кількості захворювань, зокрема злоякісних і доброякісних пухлин шкіри, та інших порушень стану здоров'я, що викликаються ультрафіолетовою радіацією.

При тривалій відсутності УФВ в організмі розвивається «світлове голодування». Тому воно необхідно для нормальної життєдіяльності людини. Однак, при тривалому впливі великих доз УФВ можуть наступити серйозні поразки очей і шкіри. Зокрема, це може призвести до розвитку раку шкіри, кератитів (запалень рогівки) і помутніння кришталика очей (фотокератиту, який характеризується прихованим періодом від 0,5 до 24 годин). Для профілактики несприятливих наслідків, викликаних дефіцитом УФВ, використовують сонячне випромінювання, влаштовуючи солярії, інсоляцію приміщень, а також застосовуючи штучні джерела УФВ.

На промислових підприємствах джерелами ультрафіолетових випромінювань є дуга електрозварювання, ртутно-кварцові лампи, лазери, інші прилади та установки. Формування й вплив на працюючих оптичного випромінювання в ультрафіолетовій області відбувається при електрогазозварювальних процесах, на роботах з плазменними технологіями

(різка металу, напилювання, наплавлення металу), при використанні різних світильників та випромінювачів з кварцовими, ртутними, галогенними лампами, інших спектральних джерел. У різних галузях економіки та народного господарства широке застосування знаходять такі сучасні технології, як ультрафіолетове сушіння, установки для знезараження повітря, поверхонь та води, різні медичні та інші випромінювачі (перукарське устаткування, манікюрні лампи, солярії та інші).

Професіональному впливу УФВ піддаються електрогазозварювальники, копіювальники друкованих форм, працівники тепличних господарств, медичний персонал (фізіотерапевти, стоматологи, педіатри) та інші працівники, обслуговуючі різні джерела ультрафіолетового випромінювання. З іншого боку, при дорожніх, сільськогосподарських, будівельних та інших видах робіт, виконуваних на свіжому повітрі, відбувається вплив на працюючих природного УФ-випромінювання, як складової сонячної радіації. Окремо слід виділити групу працівників різних професій (звані "прихвачувальники"), які виконують спільні зі зварником роботи з фіксації деталей великогабаритних конструкцій в останній момент накладення первинного шва. Ці роботи виконують самі зварювальники (різних спеціальностей), і працівники інших професій - слюсарі механозбиральних робіт, монтажники та інші. Особливість таких робіт - короткочасність використання зварювальної дуги, її "імпульсний" характер під час "прихвачування" деталей зварювальної конструкції. Зазначені роботи, необхідно виконувати в окулярах із захисними фільтрами.

При впливі надлишкового ультрафіолетового випромінювання можливий розвиток низки захворювань і патологічних станів, насамперед, із боку органу зору, серед яких найчастіше відзначаються катаракта чи помутніння кришталика очі, запалення роговиці (кератит), слизових оболонок (фотоофтальмія). УФ-переопромінювання може призвести до хвороб шкірних покривів: запалювальне почервоніння шкіри чи еритема, прискорення

старіння шкіри, алергічні реакції, пухлини шкіри, в тому числі злоякісні (рак шкіри, меланома).

До засобів колективного захисту від УФВ відносяться різні пристрої (огороджувальні, вентиляційні, автоматичного контролю і сигналізації, дистанційного управління), а також знаки безпеки. Індивідуальний захист від УФВ здійснюють різними екранами: фізичними (у вигляді різних предметів, що поглинають, розсіюють або відображають промені) і хімічними (хімічні речовини та захисні креми, що містять інгредієнти, які поглинають УФВ). Для захисту також використовують виготовлений із тканини (попліну та ін) спеціальний одяг, окуляри із захисними фільтрами. Повний захист від УФВ усіх хвиль забезпечує флінтглас (скло, що містить окис свинцю) товщиною 2 мм. При влаштуванні приміщень враховують, що відображуюча властивість різних оздоблювальних матеріалів для УФВ і видимого світла різна.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Режим зони надзвичайної екологічної ситуації

Режим зони надзвичайної екологічної ситуації - це особливий правовий режим, який може тимчасово запроваджуватися в окремих місцевостях у разі виникнення надзвичайних екологічних ситуацій і спрямовується для попередження людських і матеріальних витрат, відвернення загрози життю і здоров'ю громадян, а також усунення негативних наслідків надзвичайної екологічної ситуації.

Запровадження відповідного правового режиму передбачає виділення державою (або органами місцевого самоврядування) додаткових фінансових та інших матеріальних ресурсів, достатніх для нормалізації екологічного стану і відшкодування завданих збитків, запровадження спеціального режиму поставок продукції для державних потреб, реалізації комплексних та цільових програм громадських робіт.

Законодавство про зону надзвичайної екологічної ситуації становлять:

- Закон України від 25 червня 1991 року "Про охорону навколишнього природного середовища";
- від 14 грудня 1999 року "Про аварійно-рятувальні служби";
- від 16 березня 2000 року "Про правовий режим надзвичайного стану";
- від 13 липня 2000 року "Про зону надзвичайної екологічної ситуації";
- а також прийняті відповідно до них нормативно-правові акти.

Підставами для оголошення окремої місцевості зоною надзвичайної екологічної ситуації можуть бути:

- значне перевищення гранично допустимих норм показників якості навколишнього природного середовища, визначених законодавством;
- виникнення реальної загрози життю та здоров'ю великої кількості людей або заподіяння значної матеріальної шкоди юридичним, фізичним особам чи навколишньому природному середовищу внаслідок надмірного забруднення навколишнього природного середовища, руйнівного впливу стихійних сил природи чи інших факторів;
- негативні зміни, які сталися у навколишньому природному середовищі на значній території і які неможливо усунути без застосування надзвичайних заходів з боку держави, або які суттєво обмежують чи виключають можливість проживання населення і провадження господарської діяльності на відповідній території;
- значне збільшення рівня захворюваності населення внаслідок негативних змін у навколишньому природному середовищі. Окрема місцевість України оголошується зоною надзвичайної екологічної ситуації Указом Президента України, затвердженим Верховною Радою України за пропозицією Ради національної безпеки і оборони України або за поданням Кабінету Міністрів України.

В такому Указі Президента України має бути зазначено:

- обставини, що стали причиною та обґрунтуванням необхідності оголошення окремої місцевості зоною надзвичайної екологічної ситуації;
- межі території, на якій вона оголошується;

- заходи щодо організаційного, фінансового та матеріально-технічного забезпечення життєдіяльності населення в такій зоні;
- основні заходи, що запроваджуються для подолання наслідків надзвичайної екологічної ситуації;
- обмеження на певні види діяльності в цій зоні;
- час, з якого окрема місцевість оголошується зоною надзвичайної екологічної ситуації;
- строк, на який ця територія оголошується такою зоною.

За наявності достатніх підстав у межах зони надзвичайної екологічної ситуації може бути введений правовий режим надзвичайного стану в порядку, встановленому відповідним законом із запровадженням додаткових заходів.

Юридичні та фізичні особи, винні у порушенні правового режиму в зоні надзвичайної екологічної ситуації, несуть відповідальність згідно з законами України.

4.3 Висновки до розділу

В розділі «Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях» описано вплив ультразвуку на організм людини, також режими зони надзвичайної екологічної ситуації.

ВИСНОВКИ

Проведено аналіз оптоволоконних технологій, зокрема типів та методів виготовлення оптичних волокон, способів організації оптоволоконного зв'язку, обладнання, що при цьому засосовується.

Проаналізовано особливості застосування оптоволоконних технологій, зокрема для керування БПЛА. Проаналізовано ризики застосування оптоволоконних кабелів при цьому. Встановлено, що мало дослідженим є питання втрат в оптоволокну, яке є змотане в бухті. Так, зазвичай оптоволоконний кабель є розмотаний та спеціальним чином прокладений і має мінімальну кількість згинів, а самі згини є зачасту незначними. Однак, коли такий кабель знаходиться змотаним в бухні, то радіус згину для використання для FPV дронів є досить малим і відповідно вплив на передачу даних може бути відчутним. Також, враховуючи те, що оптоволокно буде розмотуватись від дрона у відкритому просторі, на нього будуть діяти такі додакові зовнішні фактори, як навколишня температура, вологість, тиск повітря, радіаційні впливи тощо. Все це може вносити додаткові обмеження на використання цієї технології для керування FPV дроном, або потребувати внесення певних коректив чи змін у способи модуляції і перетворення сигналів.

Проаналізовано фактори загасання сигналу в оптоволокну, зокрема механічні фактори, електромагнітні впливи, температурні впливи, вплив води, радіації, електротермічна деградація. Також проаналізовано фактори, що впливають на поляризаційно-модову дисперсію. Проведено функціональний аналіз механічних впливів на передавальні параметри оптичного волокна, зокрема мікровигинань та макровигинань, відносного видовження кабеля. Встановлено, що значення поляризаційно-модової дисперсії зі зростанням величини відносного видовження загалом збільшується, проте чіткої залежності немає.

Проведено дослідження впливу вигинів на передавальні параметри

оптоволокну, зокрема для визначення степені впливу кількості витків на величину втрат, а також вплив радіусу згину.

За результатами дослідження було побудовано графіки залежності втрат в оптичному волокні від радіусу вигину. Отримані графіки підтверджують теоретичні припущення про збільшення втрат зі зростанням довжини хвилі, зі зменшенням радіусу вигину.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Senior, John M.; Jamro, M. Yousif (2009). Optical fiber communications: principles and practice. Pearson Education. pp. 7–9. ISBN 978-0130326812.
2. Lee, Byounggho (2003). "Review of the present status of optical fiber sensors". Optical Fiber Technology. 9 (2): 57–79. Bibcode: 2003OptFT...9...57L. doi:10.1016/s1068-5200(02)00527-8
3. Posinna, Mariddetta (April 1, 2014). "different types of fiber optic cables". HFCL. Archived from the original on April 20, 2016. Retrieved April 11, 2016.
4. Large, David; Farmer, James (January 13, 2004). Modern Cable Television Technology. Elsevier. ISBN 978-0-08-051193-1.
5. Кучеренко О.К., Колобродов В. Г., Тягун В. М., Русняк І.М. Волоконна та інтегральна оптика. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 216 с.
6. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Волоконно - оптичні системи передачі / навчальний посібник. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 227 с.
7. Розорінов Г.М., Соловійов Д.О. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку, 2-ге видання. – Київ: Кафедра, 2018. – 289 с.
8. Кучеренко О.К. Волоконна і інтегральна оптика. – Київ: Політехніка, 2017.– 282 с.
9. Контроль стану оптичної лінії із застосуванням технології FDR / О. Є. Землянський, К. Л. Горященко, В. С. Коваль, А. В. Клепіковський // Вісник ХНУ. Технічні науки. – 2017. – № 3. – С. 121-125.
10. Кучеренко О.К. Волоконна та інтегральна оптика : навчальний посібник для студентів. – Київ: КПІ, 2017.– 216 с.
11. Зачек О.І., Сенік В.В., Магеровська Т.В. Інформаційні технології: навчальний посібник / О. І. Зачек, В. В. Сенік, Т. В. Магеровська. – Львів: ЛДУВС, 2022. – 432 с.
12. Paschotta R. Field Guide to Optical Fiber Technology. – Washington: SPIE, 2010. – 128 с.

13. Матеріали і компоненти функціональної електроніки: навчальний посібник (електронне видання) / Л. В. Однорець, І. М. Пазуха. – Суми: Сумський державний університет, 2020. – 200 с.

14. Бондаренко О.В., Іоргачов Д.В. Дослідження опорів заземлювальних пристроїв у неоднорідній землі: Методичне керівництво. – Одеса, 2003. – 17 с.

15. Fulconis J. Nonclassical interference and entanglement generation using a photonic crystal fiber pair photon source // *Phys. Rev. Lett.* – V. 99, № 12. – 2007. – P. 120501 – 120510.

16. Cennamo N., Pesavento M., Zeni L. A review on simple and highly sensitive plastic optical fiber probes for bio-chemical sensing // *Sens. Actuators B Chem.* – 2021. – 33 V. 331. – P. 129393.

17. Ryszard Ryszard S. Romaniuk, Dorosz Jan, *Optical Fibers and Their Applications 2020* / Proc SPIE 11456, 2020. Publisher: SPIE - International Society for Optics and Photonics, Bellingham, WA USA. Project: Tailored Optical Fibres. – 2020. – V.11456. DOI:10.1117/12.2574574

18. Joe, H.-E.; Yun, H.; Jo, S.-H.; Jun, M.B.G.; Min, B.-K. A review on optical fiber sensors for environmental monitoring. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.* – 2018. – №5. – P. 173–191.

19. Moloney Jerome V., Newell Alan C. *Nonlinear optics.* – USA: Taylor & Francis Group, 2018. – 448 p.

20. Математичне та комп'ютерне моделювання електрокардіосигналів у системах голтерівського моніторингу / Л.Є. Дедів, А.С. Свєрстюк, І.Ю. Дедів, М.О. Хвостівський, В.Г. Дозорський, Є.Б. Яворська. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 120 с. ISBN 978-617-574-218-1.

21. Математичне моделювання, методи та програмне забезпечення опрацювання дихальних шумів у комп'ютерних аускультативних діагностичних системах / І.Ю. Дедів, А.С. Свєрстюк, Л.Є. Дедів, В.Г. Дозорський, М.О. Хвостівський. – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2021. – 126 с. ISBN 978-617-574-219-8.

22. Методичні рекомендації з оформлення кваліфікаційних робіт

бакалавра за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» уклад.: Дунець В.Л., Хвостівський М.О. Дедів І.Ю. Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021 р. – 72с.

23. Дозорський В.Г., Дозорська О.Ф., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Паньків І.М., Яворська Є.Б. Структура системи відбору біосигналів для задачі відновлення комунікативної функції людини. Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – Хмельницький: редакція журналу "Вісник Хмельницького національного університету". – 2019. - №2(271) – с. 183-186.

24. Khvostivska L.V., Osukhivska H.M., Khvostivskyi M.O., Dediv S.Y. Development of methods and algorithms for a stochastic biomedical signal period calculation in medical computer diagnostic systems. Visnyk NTUU KPI Serii A - Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia, /Категорія В/ 2019. Вип. 79. С. 78-84. doi: 10.20535/RADAP.2019.79.78-84.

25. Dozorska O., Yavorska E., Dozorskyi V., Pankiv I., Dediv L. Dediv I. The Method of Indirect Restoration of Human Communicative Function. Proc. of the 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), CADSM'2019, (pp. 19–22). Polyana-Svalyava (Zakarpattya), UKRAINE 978-1-7281-0053-1/19.

26. Дозорська О.Ф., Яворська Є.Б., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю. Метод виявлення ознак основного тону в структурі електроміографічних сигналів для задачі компенсації порушеної комунікативної функції людини», Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаротобудування, (81), с. 56-64. doi: 10.20535/RADAP.2020.81.56-64.

27. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunetc V., Dediv I.. Mathematical and Algorithmic Support of Detection Useful Radiosignals in Telecommunication Networks. 2nd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, ITTAP 2022. CEUR Workshop Proceedings. Ternopil 22-24 November 2022. Vol 3309, P. 314-318. ISSN 1613-0073.

28. Гевко О.В., Дозорський В.Г., Дедів Л.Є., Дедів І.Ю., Дозорська О.Ф.

Структурний синтез вібромасажної апаратури. Перспективні технології та прилади, № 20, Луцьк, 2022. – с. 23-31.

29. Dozorskyi V., Dediv I., Sverstiuk S., Nykytyuk V., Karnaukhov A. The Method of Commands Identification to Voice Control of the Electric Wheelchair. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.233-240. ISSN 1613-0073.

30. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dediv I., Yatskiv V., Palaniza Y. Method, Algorithm and Computer Tool for Synphase Detection of Radio Signals in Telecommunication Networks with Noises. Proceedings of the 1st International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0 (CITI 2023). CEUR Workshop Proceedings. Ternopil, Ukraine, June 14-16, 2023. P.173-180. ISSN 1613-0073.

31. Khvostivska L., Khvostivskyi M., Dunets V., Dediv I. Mathematical, algorithmic and software support of synphase detection of radio signals in electronic communication networks with noises. Scientific Journal of TNTU (Tern.), vol 111, no 3, 2023. pp. 48–57.

32. Основи технології радіоелектронних апаратів : навчальний посібник / Р. А. Ткачук, В. Г. Дозорський, Л. Є. Дедів, І. Ю. Дедів. - Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. - 336 с.

33. Паляниця Ю.Б., Марценюк А.С., Дунець В.Л., Бучинський В.М., Паламар М.І. Дрон з блоком надвисоких частот для виявлення та знешкодження вибухових пристроїв та мін. Матеріали III Міжнародної наукової конференції молодих учених та студентів «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 20-21.04.2023 р. Тернопіль: ТНТУ, 2023. С. 158-159. ISBN 978-617-7875-32-0.

34. Дунець В.Л., Хвостівська Л.В., Паляниця Ю.Б. Математичне, алгоритмічне та програмне забезпечення оцінювання завадозахищеності

каналів зв'язку з балансною модуляцією. Збірник наукових праць Вісник НУВГП, серія технічні науки, випуск 4 (104), 2023. - С. 95-107. ISSN: 2306-5478.

35. Гевко І.Б., Дунець В.Л., Паляниця Ю.Б., Марценюк А.С., Химич Г.П. Дрон з імпульсним квантовим генератором для знешкодження об'єктів ураження. Матеріали IV Міжнародної наукової конференції «Воєнні конфлікти та техногенні катастрофи: історичні та психологічні наслідки» Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя: зб. тез доповідей, 18-19.04.2024 р. Тернопіль: ТНТУ, 2024.

36. Khymych, H., Dunets, V., Duda, S., Palaniza, Y., Kornieiev, K. Dual-Polarization Yagi Antenna for Meter Wavelength Range. *Radioelectronics and Communications Systems*, 66(11), 2023, pp. 609–615. ISSN 0735-2727. DOI: 10.3103/S0735272722080039.

37. Lyashuk, Oleg, Mykola Stashkiv, Yurii Palianytsia, Roman Khoroshun and Dmytro Mironov. Fourier Model Fitting for Vibration Analysis of Car Wheel Suspension Enhanced Damping System. *Proceedings of the 4rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems*, 23-25 October 2024, Ternopil, Ukraine. ITTAP-2024, 2024. ISSN 1613-0073.

38. Паляниця Ю.Б., Сверстюк А.С., Шадріна Г.М. Математичне та комп'ютерне моделювання фонокардіосигналів для удосконалення кардіодіагностичних систем / Ю.Б. Паляниця, А.С. Сверстюк, Г.М. Шадріна – Львів: Видавництво «Магнолія - 2006», 2020. – 106 с. ISBN 5-211-05310-9.

39. Dozorskyi V., Dediv L., Kovalyk S., Dozorska O., Dediv I. (2024) Design of the endoskeleton of a biocontrolled hand prosthesis. *Scientific Journal of TNTU (Tern.)*, vol. 115, no 3, pp. 100-111.

40. Техноекологія та цивільна безпека. Частина «Цивільна безпека». Навчальний посібник / В.С. Стручок, – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2022. – 150 с.

41. Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей

денної бо та заочної (дистанційної) форм навчання / В.С.Стручок. —
Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. — 156 с.

ДОДАТКИ

УДК 621.395.625.6

Ірина Дедів, канд. техн. наук, доц., Володимир Шмир, Максим Олійник
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ВПЛИВ ЕКЗОГЕННИХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ОПТОВОЛОКОННИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

Iryna Dediv, Ph.D, Assoc. Prof., Volodymyr Shmyr, Maksym Oliynyk
**INFLUENCE OF EXOGENIC FACTORS ON THE EFFICIENCY OF FIBER OPTIC
COMMUNICATION LINES**

Сьогодні відбувається стрімкий перехід на використання цифрових оптоволоконних ліній зв'язку. Однак, специфічність оптоволоконного кабелю зв'язку полягає не тільки в особливостях поширення інформаційного сигналу, а й у конструкції самого волокна, критичності його до різноманітних впливів і навантажень. Оптичне волокно чутливе до впливів екзогенних факторів, зокрема вологи, температури, радіації, зовнішніх електромагнітних впливів, електротермічної деградації, механічних впливів. Всі ці фактори призводять до збільшення згасання, а також на поверхні волокна з'являються мікротріщини і відбувається його руйнування.

Вивчення питань впливу екзогенних факторів на передавальні параметри оптичного волокна є актуальним при проектуванні високоефективних оптоволоконних ліній зв'язку. Так, сьогодні в Україні починають стрімко розвиватися технології застосування оптоволокон для організації керування БПЛА, зокрема FPV дронами. При цьому в конструкції такого БПЛА розміщується котушка з оптоволоконним кабелем, який в процесі руху дрона розмотується. Однак, мало дослідженим є питання втрат в оптоволокну, яке є змотане в бухті. Так, зазвичай оптоволоконний кабель є розмотаний та спеціальним чином прокладений і має мінімальну кількість згинів, а самі згини є зазвичай незначними. Однак, коли такий кабель знаходиться змотаним в бухті, то радіус згину для використання для керування FPV дроном є досить малим і відповідно вплив на передачу даних може бути відчутним. Також, враховуючи те, що оптоволокно буде розмотуватись від дрона у відкритому просторі, на нього будуть діяти такі додакові зовнішні фактори, як навколишня температура, вологість, тиск повітря, радіаційні впливи тощо.

Все це може вносити додаткові обмеження на використання цієї технології для керування FPV дроном, або потребувати внесення певних коректив чи змін у способи модуляції і перетворення сигналів.

Література

1. Senior, John M.; Jamro, M. Yousif (2009). Optical fiber communications: principles and practice. Pearson Education. pp. 7–9. ISBN 978-0130326812.
2. Lee, Byoungcho (2003). "Review of the present status of optical fiber sensors". Optical Fiber Technology. 9 (2): 57–79. Bibcode:2003OptFT...9...57L. doi:10.1016/s1068-5200(02)00527-8
3. Posinna, Maridetta (April 1, 2014). "different types of fiber optic cables". HFCL. Archived from the original on April 20, 2016. Retrieved April 11, 2016.
4. Large, David; Farmer, James (January 13, 2004). Modern Cable Television Technology. Elsevier. ISBN 978-0-08-051193-1.