

Розглянуто забезпечення стабільності параметрів передавання оптичного кабелю (ОК) з силовими елементами із сталевих дротів за рахунок стійкості конструкції кабелю до розтягуючого зусилля, яка залежить від допустимої деформації. На основі дослідження критеріїв допустимої деформації (видовження) ОК, запропонований оптимальний критерій, вибраний на основі властивостей сталі на границі пружної деформації її матеріалу

Ключові слова: деформація, оптичний кабель, критерій

Рассмотрено обеспечение стабильности параметров передачи оптического кабеля (ОК) с силовыми элементами из стальных проводов за счет стойкости конструкции кабеля к растягивающему усилию, которое зависит от допустимой деформации. На основе исследования критериев допустимой деформации (удлинения) ОК, предложен оптимальный критерий, выбранный на основе свойств стали на границе упругоэластичной деформации ее материала

Ключевые слова: деформация, оптический кабель, критерий

Considered provision to stabilities parameter issues of the optical cable (OK) with power element from steel wire to account of stability to designs of the cable to stretching effort, which depends on possible deformation. On base of the study of the criterion to possible deformation (the lengthening) OK, is offered optimum criterion, chosen on base characteristic become on border of the springy deformation of her(i-ts) material.

Keywords: deformation, optical cable, criterion

ВПЛИВ КОНСТРУКЦІЇ ОПТИЧНОГО КАБЕЛЮ НА СТАБІЛЬНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕДАВАННЯ

Н. В. Захарченко

Доктор технических наук, профессор, проректор по учебной работе*

О. В. Бондаренко

Доктор технических наук, профессор*

*Одесская национальная академия связи им. А.С.

Попова

ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029

Контактный тел.: 8 (048) 731-73-55

E-mail: onat@onat.edu.ua

Одним із основних показників оцінки якості оптичного кабелю являється його експлуатаційна надійність, яка в значній ступені залежить від стабільності оптичних, електричних і механічних параметрів кабелю. В свою чергу, стабільність параметрів ОК залежить від багатократних змін температури і вологості, механічних впливів на кабель і т.п.

Виходячи із структури оптичних модулів (ОМ) вибираються відповідні конструкції осердя кабелю, силових елементів та захисних покриттів з тим, щоб оптичний кабель мав високу надійність та стабільність параметрів передавання (коефіцієнта загасання та дисперсії сигналу) під час усього терміну експлуатації. Особливе значення повинно приділятися тому, щоб ОВ в цих кабелях як менше підлягали дії зовніш-

ніх впливових факторів (ЗВФ), таких як температурні перепади та механічні навантаження (вигини, розтяги та стискування).

В сучасних конструкціях ОК стабільність параметрів передавання забезпечується за рахунок створення відносного запасу (збиткової довжини) $\epsilon_{ОВ}$ оптичного волокна в ОК [1]:

$$\epsilon_{ОВ} = \frac{l_f - l}{l}, \quad (1)$$

де l_f, l - довжини ОВ та осевої лінії порожнини елемента ОК, в якому розташоване ОВ, відповідно, м.

Величина $\epsilon_{ОВ}$ вибирається із конструктивних і експлуатаційних вимог до ОК.

Тому вихідною для аналізу стійкості до дії ЗВФ конструкції ОК, що забезпечує стабільність параметрів передавання повинна бути залежність:

$$\epsilon_{ОВ} = f(\epsilon), \tag{2}$$

де $\epsilon_{ОВ}$, ϵ - допустимі деформації ОВ і ОК, відповідно.

Таким чином, задача розробки конструкції ОК з урахуванням дій ЗВФ зводиться до:

- визначення повздовжньої деформації кабелю за рахунок радіального переміщення спіральних елементів у радіальному напрямку;
- розрахунків механічної міцності кабелю по заданій вигинаючим та розтягуючим зусиллям.

У дійсний час в технічній літературі відсутній єдиний підхід до вибору критерію для розрахунку розтягуючого зусилля ОК модульної конструкції.

Так, наприклад, в [2] в якості критерію для розрахунку розтягуючого зусилля ОК приймається граничне видовження стальної проволочки силових елементів, в [3] – допустиме короткочасове видовження (деформація) ОК, при якому оптичні волокна втрачають свободу переміщення $\epsilon_{ОВ}^д$. Воно складає від 0,25 до 1% для різних конструкцій кабелів. В [4] в якості критерію для розрахунку розтягуючого зусилля ОК приймається максимально допустиме короткочасове видовження ОК.

Метою даної роботи являється визначення оптимального критерію для розрахунку розтягуючого зусилля ОК модульної конструкції з силовими елементами (СЕ) із сталених дротів, яка забезпечить довгострокову стабільність параметрів передавання кабелю.

При цьому в роботі прийняті наступні припущення:

- дрони центрального силового елемента (ЦСЕ) та периферійного силового елемента (ПСЕ) працюють у межах пружної деформації;
- величини розтягуючих зусиль полімерних матеріалів в сумарну величину розтягуючого зусилля ОК не враховуються внаслідок їх малості.

В зв'язку із вищевикладеним розглянемо підходи, що використовуються для визначення критерію розрахунку розтягуючого зусилля ОК в [2,3,4].

Як відомо [5] величина допустимого розтягуючого зусилля, що забезпечується конструкцією ОК визначається із виразу:

$$F_d \leq \sum_{i=2}^n E_i S_i \epsilon_{дк} + n_{ОВ} E_{ОВ} S_{ОВ} \epsilon_{ОВ} \cos \theta, \tag{3}$$

де F_d - допустиме розтягуюче зусилля ОК, Н; E_i - модуль Юнга і-го елемента ОК, ГПа; S_i - площа поперечного розтину і-го елемента ОК, мм²; $\epsilon_{дк}$ - допустиме видовження ОК; $n_{ОВ}$ - число ОВ в кабелі; $E_{ОВ}$ - модуль Юнга ОВ, ГПа; $S_{ОВ}$ - площа поперечного розтину ОВ, мм²; $\epsilon_{ОВ}$ - допустиме видовження ОВ; θ - кут скрутки ОВ до вісі ОК ($\theta = \arctg \frac{2\pi A}{h}$); A - радіус скрутки волокна, мм; h - крок скрутки ОВ, мм; n - число елементів ОК, без урахування ОВ.

Величини $\epsilon_{дк}$ і $\epsilon_{ОВ}$ в загальному випадку не дорівнюють одна одній, так як ОВ в оптичному модулі має деяку збиткову довжину за рахунок укладки в трубіці ОМ по гелікоїді в процесі виготовлення кабелю. Інши-

ми словами, необхідно створити таку конструкцію ОК, в якій ОВ не підлягає деформації до деякого видовження кабелю ϵ_k . Це значення подовження кабелю по-являється тільки тоді, коли волокно розпрямляється в трубіці ОМ і втрачає свободу переміщення.

В інженерних розрахунках F_d допускається визначати тільки розтягуючими зусиллями, які забезпечують ЦСЕ, ПСЕ.

$$F_d = F_{ЦСЕ} + F_{ПСЕ}. \tag{4}$$

Розтягуючі зусилля F , що забезпечують решта елементів ОК являються незначними, тому його значення приймається, як правило, в якості технологічного запасу конструкції ОК по розтягуючим зусиллям [4].

В [2] критерій розрахунку розтягуючого зусилля ОК вибирається виходячи із поведінки сталюого дроту на границі пружної деформації його матеріалу $\sigma_{др}^п$.

На рис.1 приведена експериментальна якісна залежність напруженості металів з урахуванням пружної та непружної деформації [2,6].

Із цієї залежності видно, що у металів є області різних деформацій, що відповідають різним напруженням їх матеріалів, які відокремлені границями: пропорціональності $\sigma^п$, текучості $\sigma^т$ та міцності $\sigma^р$.

Границя пропорціональності відповідає найбільшому напруженню металу, при якому іще справедливий закон Гука. Границя текучості відповідає напруженню металу, при якому з'являється його текучість. Границя міцності відповідає напруженню металу, при якому він розривається.

В рамках пружності деформації згідно до [7] сталюий дріт видовжується до 1%, після чого починає «текти», постійно деформується, і, нарешті розривається при досягненні 13%.

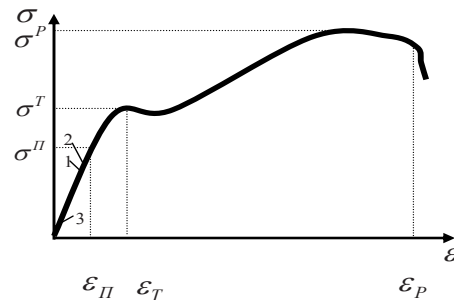


Рис. 1. Експериментальна діаграма розтягу металу

Як визначається в [2], часто границя текучості $\sigma^т$ сприймається за точку перелому діаграми.

З цієї діаграми робиться висновок, що сталюий дріт має границю текучості $\sigma_{др}^т$, після якої його властивості змінюються, тобто він стає пластичним та має залишкову деформацію $\epsilon_{др}^0$, при якій захищати конструкцію ОК від розтягуючих зусиль стає неможливим.

Для забезпечення стійкості кабелю до розтягання необхідно забезпечити роботу його силових елементів у межах зберігання закону Гука, в області пружної деформації, що не приводить до розриву ОВ.

В табл. 1 приведені значення границі текучості ($\sigma_{др}^т$), розривної міцності ($\sigma_{др}^р$), модулю пружності (E), деформацій при текучості ($\epsilon_{др}^т$) та при розриві

($\epsilon_{др}^P$) деяких марок сталі дротів, що вживаються в кабельній промисловості [2].

В [2] для підвищення запасу міцності ОК пропонується за точку перелому сприймати не $\sigma_{др}^T$, а $\sigma_{др}^П$, тобто напруженість дроту на границі пропорціональності, на якій залишкова деформація сталі ще дорівнює нулю.

Таблиця 1

Значення параметрів сталі дротів, що вживаються у кабельній промисловості

Матеріал	Параметр				
	$\sigma_{др}^T$, МПа	$\sigma_{др}^P$, МПа	E, ГПа	$\sigma_{др}^T$, %	$\sigma_{др}^P$, %
Сталь 30	330	530	200	0,17	28
Сталь 30, сталиста	1030	1100	200	0,52	11
Сталь 30 ХГСА	850	1100	200	0,43	10
Сталь 30ХГСА, сталиста	1400	1620	200	0,70	10

Звичайно $\sigma_{др}^П$ і $\sigma_{др}^T$ в стандартах на дріт не нормуються, так як їх важко точно визначити і вони сильно залежить від його попередньої термомеханічної обробки (закалки, нагартування). Для попередніх розрахунків $\sigma_{др}^П$ в [2] пропонується використовувати їх приблизні значення, виражені у долях кратності розривної міцності сталі. Такий підхід часто використовується у сопроматі, наприклад, для оцінки довгострокового розтягуючого зусилля [6]. Він заснований на тому, що пропорції між граничними напруженнями менш за все залежать від конкретної марки матеріалу. Це дозволяє розповсюдити данні окремих експериментів на весь клас матеріалів. Орієнтовні значення відношень границь текучості та розривної міцності, пропорціональності та розривної міцності для марок сталі, приведені в табл. 2.

Таким чином, по значенням відносної границі $\sigma_{др}^П / \sigma_{др}^P$ та $\sigma_{др}^T / \sigma_{др}^P$ можливо визначити границю пропорціональності сталю дроту $\sigma_{др}^П$ та деформацію, що їй відповідає.

Таблиця 2

Орієнтовні значення відносних границь текучості і пропорціональності для сталі, що вживається в кабельній промисловості

Матеріал	Значення відносних границь текучості і пропорціональності	
	$\sigma_{др}^T / \sigma_{др}^P$	$\sigma_{др}^П / \sigma_{др}^P$
Сталь відпалювана	0,6	0,5
Сталь сталиста	0,8	0,6

Як правило, в конструкціях ОК для ПСЕ використовується сталиста проволока, а для ПСЕ – м'яка відпалювана проволока.

За даними табл. 2 границі напруження сталевих силових елементів від деформації можливо визначити за виразами для:

$$- \text{ЦСЕ } \sigma_{др}^П = 0,6\sigma_{др}^P ; - \text{ПСЕ } \sigma_{др}^П = 0,5\sigma_{др}^P. \quad (5)$$

Відповідно цим границям значення допустимої деформації проволоч ЦСЕ та ПСЕ можуть бути визначеними за виразом:

$$\epsilon_{др}^П = \frac{\sigma_{др}^П}{E}. \quad (6)$$

В [3] критерій розрахунку розтягуючого зусилля ОК визначається із геометричних розмірів осердя кабелю та типу скрутки елементів, без урахування видовження СЕ.

Наприклад, у ОК модульної конструкції з спіральною укладкою елементів осердя критерій розрахунку його розтягуючого зусилля у цій роботі визначається деформацією кабелю при якій втрачається вільне переміщення волокна ϵ_K .

Як указувалось вище, ОБ в ненавантаженому стані у полії оболонці (трубці) оптичного модуля може вільно переміщуватися. При цьому ОБ або пучок ОБ розташовується у центрі ОМ, і його зазор ΔR (по відношенню до захисної трубки) визначається з урахуванням внутрішнього діаметра d_i ОМ і зовнішнього діаметра d_f світловода чи пучка ОБ (рис. 2). У разі багатоводного модуля за зовнішній діаметр d_f слід приймати діаметр уявного кола, що охоплює світловоди як можна щільніше.

Згідно до [3] допустиме видовження ОК визначається за виразом:

$$\epsilon_K = -1 + \sqrt{1 + \frac{4\pi^2 R^2}{h^2} \left(2 \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)}, \quad (7)$$

де R – радіус скрутки елементів осердя ОК (оптичних модулів, заповнювачів) навколо ЦСЕ – відстань між віссю ОК і серединою елемента, що скручується, мм;

h - крок скрутки елементів осердя ОК, мм.

Крок скрутки елементів осердя ОК та радіус кривизни цієї просторової кривої, вздовж якої скручуються елементи осердя ОК, мм, визначаються за виразами:

$$h = 2\pi R \sqrt{\frac{\rho}{R} - 1}; \quad \rho = R \left\{ 1 + \left(\frac{h}{2\pi R} \right)^2 \right\}. \quad (8)$$

Згідно до [3] ρ повинен мати оптимальне значення для стандартного ОБ. Це значення забезпечує міцність конструкції ОК та задані величини параметрів передавання.

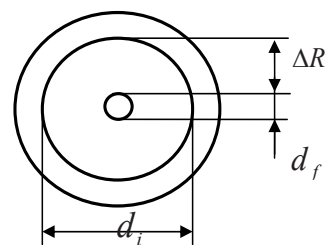


Рис. 2. Оптичне волокно у трубці оптичного модуля

Таким чином, як відмічається у [3], по виразу (7) можливо с достатньою точністю для практики конструювання ОК визначати ϵ_k .

В [4] для визначення критерію для розрахунку розтягуючого зусилля ОК використовується вираз максимального допустимого короткочасного видовження кабелю

$$\epsilon_{mk} = \epsilon_k + \epsilon_{dv}, \tag{9}$$

де ϵ_{mk} - максимально допустиме короткочасне видовження ОК; ϵ_k - допустиме видовження ОК (7); ϵ_{dv} - допустиме видовження ОВ.

Величина ϵ_{dv} при максимальному навантаженні на ОК може сприймати значення, яке дорівнює 30% від видовження ОВ при відбраковочному тесті волокна на розтяг [7].

Розтягуюче навантаження ОВ при відбраковочному тесті – 0,34 ГПа відповідає видовженню волокна в 0,6% [7]. При цьому ϵ_{dv} складає 0,18%.

По даним фірми «Corning», неперервне максимальне навантаження на кварцове ОВ на протязі 40 років, що викликає видовження волокна до 0,2%, не дає приріст коефіцієнта загасання ОВ [4]. Отже, таке значення ϵ_{dv} дозволяє забезпечити термін служби ОК з достатнім запасом довготривалої міцності ОВ.

В [3,4] вказується, що у більшості випадків розрахунок F_d значення $\epsilon_{dv} = 0,25\%$. Тому для розрахунків F_d на базі ОВ звичайної міцності ϵ_{dv} вибирається у межах від (0,18... 0,25)%.

Для якісної оцінки критеріїв розрахунку допустимого розтягуючого зусилля ОК, що прийняті в роботах [2,3,4] в даній роботі за виразами (6), (7) та (9), були визначені значення $\epsilon_{ПСЕ}$, $\epsilon_{ПСЕ}$, ϵ_k і ϵ_{mk} для аналога кабеля типу ОКЛК.

При цьому в його конструкції діаметр сталюого дроту ПСЕ приймався рівним 2,5 мм, а діаметр дроту ПСЕ – 1,8 мм. Для ПСЕ вибирався дріт із сталюїстї сталі, для ПСЕ – відпалюваної сталі. Периферійний силовий елемент кабелю складався із 23 дротів. Діаметр трубки ОМ складав 2,5 мм при товщині трубки ОМ $\Delta = 0,35$ мм, а крок скрутки ОМ $h = 80$ мм Число ОВ в ОМ дорівнювало 6. Значення $\epsilon_{dv} = 0,2\%$.

Результати визначених критеріїв розрахунку допустимих розтягуючи зусиль ОК, отримані по формулам різних авторів [2,3,4], приведені в табл. 3.

Таблиця 3

Результати розрахунку допустимих значень деформації дротів ПСЕ та видовження ОК, виконані за різними літературними джерелами [2,3,4]

Параметр	Літературне джерело			
	[1]		[2]	[3]
	$\epsilon_{ПСЕ}, \%$	$\epsilon_{ПСЕ}, \%$	$\epsilon_k, \%$	$\epsilon_{mk}, \%$
Значення параметру	0,480	0,133	0,750	0,950

Висновки

Результати аналізу даних досліджень дозволили виявити, що:

- оптичний кабель слід розглядати як складну систему, параметри якої залежать від багатьох факторів, серед яких, в першу чергу, необхідно враховувати ЗВФ: температурні перепади та механічні навантаження;

- для забезпечення високої надійності та стабільності параметрів передавання під час усього терміну експлуатації ОК необхідно підвищити якість інженерних розрахунків і уникнути помилок при проектуванні їх конструкції. Останнє забезпечується правильним вибором оптимальної допустимої поздовжньої деформації ОК.

- методи розрахунку допустимого видовження вибраної конструкції ОК з урахуванням досягнення ними критеріїв деформацій, при яких оптичне волокно втрачає або не втрачає свободу переміщення [3,4] являються недопустимими, так як значення ϵ_k та ϵ_{mk} значно перевищують значення границі пропорційності напруженості м'якого дроту. Останнє може привести до розробки конструкції ОК з низькою стійкістю до розтягуючих зусиль, нестабільними параметрами передавання та незначним терміном служби;

- в цілому за значення оптимального критерію гранично допустимого короткочасного видовження ОК модульної конструкції з СЕ із сталюого дроту потрібно вважати найменшу границю пропорційності напруженості матеріалів силових елементів;

- оптимальним критерієм гранично допустимого короткочасного видовження ОК модульної конструкції з силовими елементами із м'якого та сталюого дроту може бути тільки границя пружної деформації м'якого дроту.

Література

- 1 Ларин Ю.Т. Оптические кабели: Методы расчета конструкции. Материалы. Надежность по ионизирующему излучению.-М.: Престиж, 2006.
- 2 Колосков Д. В. Критерии расчета механических характеристик оптических кабелей. – М.: Кабельная техника, вып. 6, 1995.
- 3 Мальке Г. Волоконно-оптические кабели. Основы проектирования кабелей / Мальке Г, Гёссинг П.. Планирование систем. Corning Cable Sestems, 2001.
- 4 Бондаренко О. В. Выбор конструкции самонесущего оптического кабеля по растягивающим нагрузкам / Бондаренко О. В., Иоргачов Д. В., Мурадян Л.. – Одесса: Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2001, №1.
- 5 Иоргачов Д. В. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация. / Иоргачов Д. В., Бондаренко О. В, Дащенко А. Ф., Усов А. В. Монография. – Одесса: Астропринт, 2000.
- 6 Федосеев В. И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1979.
- 7 Розорінов Г. М. Високошвидкісні волоконно-оптичні лінії зв'язку. / Розорінов Г. М., Соловійов Д. О. Навч. посіб. – К.: Ліра – К, 2007.