

УДК 621.315.2

**ВИБІР СТРУКТУРИ ОСЕРДЯ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ
БАГАТОМОДУЛЬНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗА ЕКОНОМІЧНОЮ
ЕФЕКТИВНІСТЮ**

Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Багачук Д.Г., Ромащенко В.В., Вербицький О.О.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова
вул. Кузнечна, 1, м. Одеса, Україна, 65029
vols@onat.edu.ua*

**ВЫБОР СТРУКТУРЫ СЕРДЕЧНИКА ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ
МНОГОМОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ ПО ЭКОНОМИЧЕСКОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ**

Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Багачук Д.Г., Ромащенко В.В., Вербицкий А.А.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
ул. Кузнечная, 1, г. Одесса, Украина, 65029
vols@onat.edu.ua*

**CHOICE OF OPTICAL CABLE CORE STRUCTURE
WITH MULTIMODAL DESIGN FOR ECONOMIC
EFFICIENCY**

Bondarenko O.V., Stepanov D.M., Bagachuk D.G., Romashchenko V.V., Verbitsky O.O.

*O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications
Kovalska St., 1, Odessa, Ukraine, 65029
vols@onat.edu.ua*

Анотація. В даній роботі проведено обґрунтування та оптимізацію процесу вибору структури осердя багатомодульних оптичних кабелів (ОК) за економічною ефективністю, що виконується на етапі їх проектування за рахунок зміни конструктивних особливостей. Для досягнення поставленої мети розроблено десять моделей конструкції ОК з різною структурою осердя і кількістю ОВ та на основі їх досліджень надані рекомендації щодо удосконалення вибору конструктивних особливостей кабелю з одночасним забезпеченням мінімізації його собівартості.

Ключові слова: технологія FTTH, оптичний кабель, структура осердя, собівартість кабелю, конструктивні елементи, геометричні розміри, трубка оптичного модуля.

Аннотация. В данной работе проведено обоснование и оптимизацию процесса выбора структуры сердечника многомодульных оптических кабелей (ОК) по экономической эффективности, который выполняется на этапе их проектирования за счет изменения конструктивных особенностей. Для достижения поставленной цели разработаны десять моделей конструкций ОК с разной структурой сердечника и количеством ОВ и на основе их исследований даны рекомендации по усовершенствованию выбора конструктивных особенностей кабеля с одновременным обеспечением минимизации его себестоимости.

Ключевые слова: технология FTTH, оптический кабель, структура сердечника, себестоимость кабеля, конструктивные элементы, геометрические размеры, трубка оптического модуля.

Abstract. In this paper the study and optimization of the selection core structure process of the multi-module optical cable (OC) for economic efficiency is done. It is achieved by changing of the cable design features. To achieve this goal developed ten models of cable designs with different core structure and the number of fibers and based on their research the recommendations for improving the selection of design features of the cable while allowing to minimize its costs are given.

Key words: FTTH technology, optical cable, core structure, cable cost, structural elements, the geometrical dimensions, tube optical module.

Стрімкий процес впровадження технологій Fiber To The Build (FTTB) та Fiber To The Home (FTTH) в Європі та країнах СНД призводить до необхідності розширення оптичних мереж абонентського доступу, що вимагає розробки та виробництва в Україні відповідних

конструкцій оптичних кабелів для задоволення потреб в телекомунікаційних послугах значної кількості абонентів.

З цією метою на мережах абонентського доступу, наприклад, можуть застосовуватися технології FTTH PON або FTTH Ethernet. Серйозним фактором, що стримує широке впровадження технології PON FTTH, є вартість активного абонентського обладнання та низка інших недоліків, що описані, наприклад, в [1].

Прокладання прямої оптоволоконної лінії до абонентських пристроїв може забезпечити практично необмежену частотну смугу пропускання, що задовольнить потребу клієнтів-користувачів у збільшенні пропускну здатності мережі зв'язку при розгортанні додаткових сервісів у майбутньому. Архітектура Ethernet FTTH дозволяє провайдеру гарантувати надання кінцевому обладнанню кожного абонента необхідну пропускну здатність і створювати в мережі абонентського доступу профілі смуги пропускання для кожного клієнта індивідуально [2].

Для забезпечення необхідної пропускну здатності магістральних ліній абонентських мереж зв'язку виробляють ОК модульного типу (скручення), що будуть містити необхідну значну кількість від 24 до 1000 і більше) одномодових волокон. Модульні конструкції осердя ОК можуть мати різну структуру (наприклад, [3–6]), тобто різну кількість та розміри елементів повивного скручення, що обумовлює відмінність геометричних розмірів центрального силового елемента (ЦСЕ) та осердя кабелю в цілому. Розмір ЦСЕ, в свою чергу, є визначальним при розрахунку величини максимально допустимого розтягувального навантаження ОК, за значенням якого оцінюється поздовжня механічна міцність кабелю.

Крім того, в умовах ринкових відносин підприємства зацікавлені в отриманні максимально можливого економічного ефекту від впровадження нової апаратури та обладнання, який значною мірою пов'язаний з їх собівартістю. Це вимагає постійного удосконалення оптимальних за конструкцією складових мережі абонентського доступу, організації технологічних процесів при їх виготовленні, а також проведення необхідних наукових досліджень на етапі розробки кожного виробу з розв'язанням задачі мінімізації економічних витрат на його виробництво.

У відомих роботах [7, 8] показано послідовність розробки та метод розрахунку параметрів конструкції модульних багатоповивних оптичних кабелів на основі лише шестиелементного осердя за критерієм мінімальної собівартості. Проте, враховуючи досвід світових фірм-виробників кабельної продукції [3–6], очевидно, що для проектування та виробництва сучасних економічно вигідних конструкцій ОК необхідно встановити зв'язок між структурою осердя оптичних кабелів (кількістю та розмірами елементів скручення), кількістю оптичних волокон в них та повною собівартістю кабелю. Це дозволить на етапі його проектування в залежності від області застосування та призначення кабелю вибирати структуру його осердя, виходячи з заданої кількості оптичних волокон (ОВ), та економити на матеріалах конструктивних елементів, забезпечуючи зменшення їх собівартості.

Тому, **метою даної статті** є дослідження процесу вибору структури осердя модульного одно- та багатоповивного кабелю з одночасним забезпеченням необхідної ємності оптичними волокнами та мінімізації собівартості кабелю у цілому, обґрунтування та оптимізація процесу вибору структури осердя оптичних кабелів багатомодульної конструкції.

В загальному виді структуру осердя оптичного кабелю одноповивної модульної конструкції показано на рис. 1.

Згідно з [9, 10] діаметр центрального силового елемента d в ОК одноповивного скручення з числом n елементів повиву (трубок оптичного модуля або заповнювальних елементів), всі з яких мають діаметр D (рис. 1), може бути визначений за виразом

$$d = D \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \theta} \left[\frac{1}{\sin^2 \pi/n} - 1 \right]} - 1 \right), \quad (1)$$

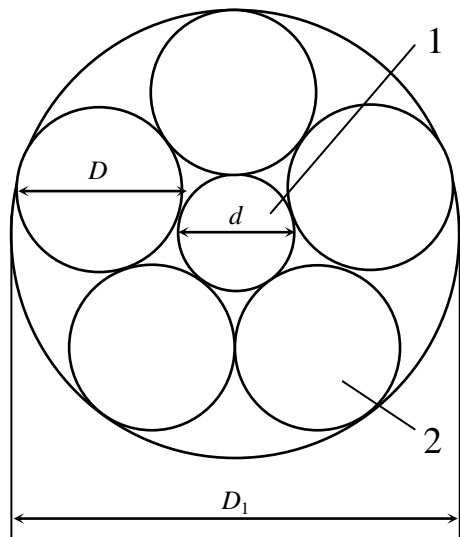
де d – діаметр центрального силового елемента, мм; D – діаметр елемента повиву, мм; θ – кут спірального укладання n елементів повиву осердя ОК; n – кількість елементів повиву.

Загальний діаметр осердя ОК визначається за виразом [9, 10]

$$D_1 = D \left(\sqrt{1 + \frac{1}{\sin^2 \theta} \left[\frac{1}{\sin^2 \frac{\pi}{n}} - 1 \right]} + 1 \right), \quad (2)$$

де D_1 – діаметр осердя ОК, мм.

Використовуючи вирази (1) та (2) в літературі [9, 10], отримано коефіцієнти, що показують зв'язок між кількістю елементів повиву в осерді ОК і геометричними розмірами



центрального силового елемента d та діаметром елемента повиву D .

Згідно з джерелами, наприклад [3 – 6], такі найбільш відомі світові фірми-виробники оптичних кабелів, як OFS, Fujikura, Sumitomo Electric LTD, Corning поміщають в перший повив осердя ОК кількість елементів, в основному, 4, 5, 6, 9 або 12 (табл. 1). Як відомо, згідно з законом «правильного скручення» при повивному спіральному укладанні елементів осердя кабелю їх кількість в кожному наступному повиві збільшується на шість порівняно з попереднім. Винятком є випадок, коли в центрі розташовано один елемент, тоді в наступному повиві елементів більше на 5. Це обумовлює різноманітність конструкцій осердя таких ОК не лише за кількістю та діаметром елементів повиву, а й за діаметром ЦСЕ (тобто можливістю ОК витримувати певні поздовжні механічні навантаження), діаметром усього повиву та кількістю оптичних модулів (ОМ) (або ЗЕ) в подальших після першого повивах.

Рисунок 1 – Конструкція осердя ОК одноповивної структури: 1 – ЦСЕ; 2 – елемент повиву осердя ОК (ЦСЕ або заповнювальний елемент (ЗЕ))

Загальна кількість та діаметр ОМ в осерді ОК обумовлює загальну ємність ОВ в кабелі, що, у свою чергу, визначає область його застосування.

Таблиця 1 – Результати огляду конструкцій модульних осердь ОК найбільш відомих світових фірм-виробників

Фірма-виробник оптичних кабелів	Кількість елементів першого повиву ОК	Загальна кількість оптичних волокон в ОК з одно- та багатоповивною структурою
OFS	5, 6, 12	2...288
Fujikura	4, 5, 6, 12	6...576
Sumitomo Electric LTD	5, 6, 9, 12	2...288
Corning	6, 12	2...432

Придатність конструкції ОК до застосування в різних умовах експлуатації (в ґрунті, в кабельній каналізації, підвішуванні на опорах повітряних ліній) з певними механічними навантаженнями визначається згідно з, наприклад [7, 8, 10] за величиною поздовжнього допустимого розтягувального навантаження F_k , критерієм визначення якого є поздовжнє максимально допустиме відносне видовження (МДВВ) ОК ε_{mk} .

Розрахунок максимально допустимого відносного видовження кабелю проводиться за виразом [7, 9]

$$\varepsilon_{mk} = \varepsilon_{dk} + \varepsilon_{дов}, \quad (3)$$

де $\varepsilon_{\text{МК}}$ – максимально допустиме відносне видовження кабелю; $\varepsilon_{\text{ДК}}$ – допустиме відносне видовження кабелю; $\varepsilon_{\text{ДОВ}}$ – допустиме відносне видовження ОВ.

Таким чином, змінювати структуру осердя ОК можна в межах забезпечення величини $\varepsilon_{\text{МК}}$ заданим або очікуваним значенням, що забезпечить стабільність передавальних характеристик ОВ за рахунок відсутності прикладання механічних навантажень на них [7]. Величина $F_{\text{к}}$ кабелю забезпечується, в першу чергу, конструкцією ЦСЕ та кількістю арамідних ниток повиву периферійного силового елемента (ПСЕ).

Розрахунок МДВВ кабелю $\varepsilon_{\text{к}}$ в залежності від радіуса укладання ОМ в осердя кабелю, кроку спірального укладання ОМ в осерді та величини відстані між внутрішньою поверхнею стінки трубки оптичного модуля й усіма ОВ в ній, як відомо, можна визначити за формулою [7, 8, 9]

$$\varepsilon_{\text{к}} = -1 + \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \pi^2 \cdot R^2}{h^2} \cdot \left(\frac{2\Delta R}{R} - \frac{\Delta R^2}{R^2} \right)}, \quad (4)$$

де $\varepsilon_{\text{к}}$ – допустиме відносне видовження кабелю, за якого ОВ втрачає свободу переміщення в трубці ОМ та ще не підлягає дії розтягувального навантаження; R – радіус укладання ОМ в осердя кабелю, мм; ΔR – відстань між ОВ та внутрішньою поверхнею стінки оптичного модуля, мм; h – крок спірального укладання елементів осердя навколо центрального силового елемента, мм.

В роботі [8] доведено, що розробка багатоповивної конструкції осердя кабелю за величиною поздовжнього навантаження повинна визначатися геометричними параметрами елементів першого повиву. Таким чином, структура осердя ОК за першим повивом впливає на загальну ємність ОВ в кабелі, механічну міцність ЦСЕ ОК, об'єм витратних матеріалів на конструктивні елементи кабелю, що впливає на його собівартість.

Розрахунок собівартості ОК базується, в першу чергу, на визначенні маси його конструктивних елементів та ціни матеріалу на їх виготовлення [11]. Основні конструктивні елементи ОК мають циліндричну форму та є суцільними стержнями (наприклад, ОВ, ЦСЕ, ЗЕ) або трубчатими (наприклад, трубка ОМ, захисний шланг).

Формули для розрахунку мас суцільних циліндричних та трубчатих конструктивних елементів ОК надані, наприклад, в [8, 11].

У даній роботі, використовуючи все вищесказане та вирази (1), (2), розроблено десять моделей структури осердя ОК з різною кількістю ОВ та ОМ (елементів) к першому повиві. Крім цього, передбачувані моделі можуть мати декілька повивів ОМ з певною кількістю ОВ в них та забезпечувати задану ємність кабелю.

Як приклад в роботі зроблено розрахунки повної собівартості розроблених моделей ОК. В розроблених моделях ОК було прийнято: діаметр ОМ $d_{\text{ОМ}} = 2,3$ мм з кількістю ОВ в кожному модулі $N_{\text{ОВ}} = 12$, діаметр ОВ в захисному покритті $d_{\text{ОВ}} = 0,255$ мм, крок спірального укладання елементів повивів $h = 90$ мм [8]. Щільності матеріалів та напівфабрикатів, використаних при розрахунках, для конструктивних елементів ОК надані в табл. 2, а їх вартість відповідає цінам, використаним згідно з [11].

У даній роботі прийнято припущення, що всі трубки ОМ в ОК мають повне заповнення, тобто містять по 12 ОВ у кожному.

У табл. 3 надано результати розрахунку загальної кількості ОВ в ОК та повної собівартості одно-, двох- та триповивних кабелів з різною структурою осердя.

На рис. 2 та 3 показано отримані залежності повної собівартості ОК $C_{\text{ОК}}$ від кількості ОВ в ньому за різної структури осердя кабелю (кількості ОМ в першому повиві, загальної кількості повивів в ОК).

Таблиця 2 – Щільності матеріалів та напівфабрикатів конструктивних елементів ОК

№ з/п	Назва елемента ОК	Матеріал елемента	Щільність матеріалу елемента $\gamma \cdot 10^{-6}, \text{г/см}^3$
1	Оптичне волокно	кварц	2,20
2	Центральний силовий елемент	склопластик	2,00
3	Трубка оптичного модуля	полібутилентерефталат	1,38
4	Гідрофобний заповнювач	тиксотропний гель	0,83
5	Водоблокуюча стрічка	поліетилентерефталат	1,39
6	Периферійний силовий елемент	арамідні нитки	1,45
7	Захисний шланг	поліетилен	0,94

Таблиця 3 – Результати розрахунку повної собівартості одно- та багатоповивних конструкцій ОК з різною структурою осердя

Кількості ОМ в першому повиві	Кількість повивів в ОК					
	I		II		III	
	Загальна кількість ОВ $N_{ОВ}$	Повна собівартість ОК $C_{ОК}$, грн.	Загальна кількість ОВ $N_{ОВ}$	Повна собівартість ОК $C_{ОК}$, грн.	Загальна кількість ОВ $N_{ОВ}$	Повна собівартість ОК $C_{ОК}$, грн.
3	36	3550,4	144	5005,3	324	7460,3
4	48	3765,6	168	5422,8	360	8095,2
5	60	3990,9	192	5856,1	396	8752,1
6	72	4229,2	216	6304,9	432	9429,7
7	84	4479,5	240	6769,4	468	10128,4
8	96	4742,0	264	7249,7	504	10848,2
9	108	5017,3	288	7746,7	540	11590,4
10	120	5305,4	312	8260,3	576	12354,9
11	132	5606,7	336	8791,2	612	13142,6
12	144	5922,1	360	9340,3	648	13950,0

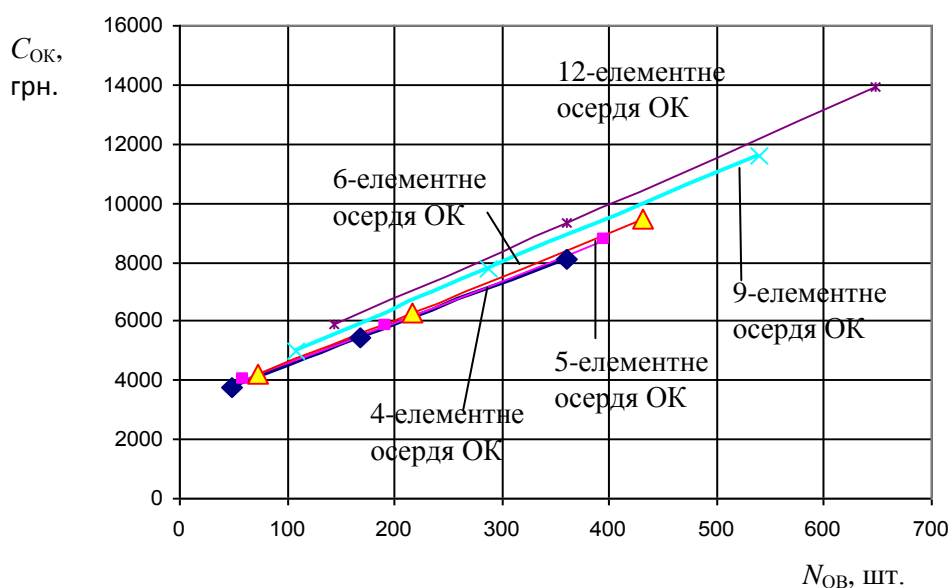


Рисунок 2 – Залежність повної собівартості ОК $C_{ОК}$ від кількості ОВ $N_{ОВ}$ для 4-, 5-, 6-, 9- та 12-елементної структури осердя кабелю

З рис. 2 видно, що зі збільшенням кількості ОМ від 4 до 12 в одно-, двух- та триповивній структурі осердя ОК собівартість кабелю буде збільшуватися. Причому отримані залежності повної собівартості ОК від кількості оптичних волокон в кабелі є лінійними.

На рис. 3 показано залежність собівартості ОК від загальної кількості ОВ в кабелі з різною кількістю повивів та елементів. Встановлено, що збільшення собівартості ОК за рахунок

збільшення кількості трубок ОМ (а отже й загальної ємності ОВ в кабелі) від 3 до 12 у першому повиві в одноповивному осерді кабелю становить 66,8 %, у двоповивному – 86,6 %, в триповивному – 87%. Надані результати розрахунку собівартості ОК у відсотках означають, що зі збільшенням кількості повивів у кабелі зміни у структурі його осердя будуть призводити до більших матеріальних затрат на його виробництво.

З табл. 4 та рис. 4 видно, що параметр-критерій економічної ефективності ОК зменшується при збільшенні кількості ОВ та ОМ в осерді кабелю. Таким чином, при збільшенні ємності ОВ в кабелі за рахунок створення додаткових трубок ОМ або повивів з оптичними модулями є можливість отримати багатоволоконну конструкцію ОК зі зменшеними витратами на одне оптичне волокно, тобто отримати економічнішу структуру кабелю. Так, з рис. 4 видно, наприклад, що при застосуванні триповивного ОК параметр-критерію економічної ефективності стабілізується та перестає залежати від структури ОК та кількості ОВ у ньому. Зміна параметр-критерію економічної ефективності кабелю за кількістю оптичних волокон при зміні кількості ОМ у повиві від 3 до 12 становить для одноповивного осердя кабелю 58,3 %, для двоповивного – 25,4 %, для триповивного – 6,6 %.

Як видно з табл. 3, усі розроблені моделі ОК мають різну ємність ОВ та собівартість. Тому для кількісного порівняння ефективності застосування цих моделей в даній роботі пропонується ввести параметр-критерій економічної ефективності ОК за кількістю оптичних волокон, який буде характеризувати частину собівартості кабелю віднесеної до одного ОВ, тобто $\frac{C_{\text{каб}}}{N_{\text{ОВ}}}$

(табл. 4, рис. 4).

Таблиця 4 – Результати розрахунку параметр-критерію економічної ефективності конструкції ОК за кількістю оптичних волокон

Кількість повивів в осерді ОК	Параметр-критерій економічної ефективності конструкції ОК за кількістю оптичних волокон $C_{\text{каб}}/N_{\text{ОВ}}$ за кількістю ОМ					
	3	4	5	6	9	12
I	98,62	78,45	66,52	58,74	46,45	41,12
II	34,76	32,27	30,50	29,19	26,89	25,94
III	23,03	22,48	22,10	21,82	21,56	21,52

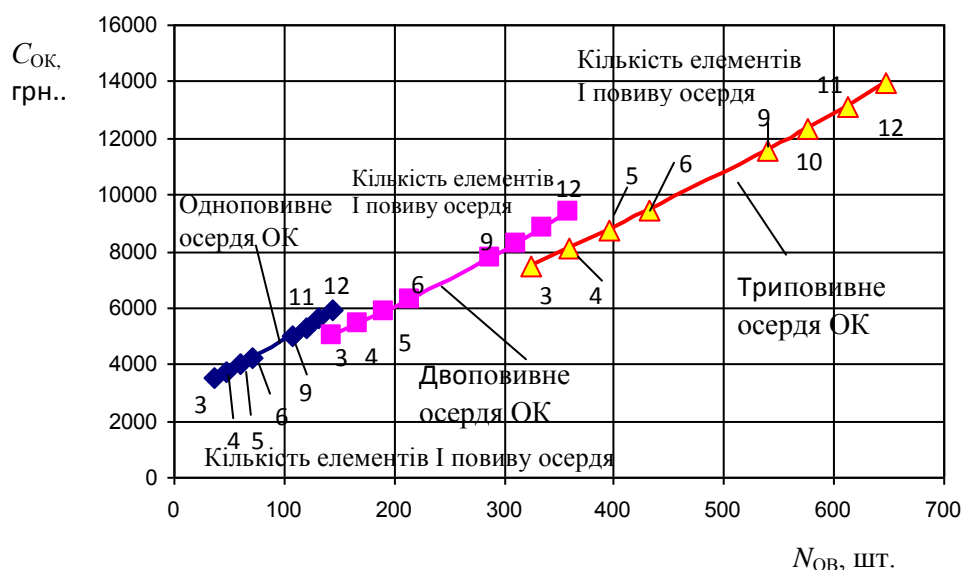


Рисунок 3 – Залежність повної собівартості ОК $C_{\text{ОК}}$ від кількості ОВ $N_{\text{ОВ}}$ для одно-, дво- та триповивної конструкції осердя кабелю

Результати проведених в даній роботі досліджень процесу вибору модульної структури осердя ОК за економічною ефективністю в залежності від параметрів його конструктивних елементів дозволили зробити висновки:

1. В роботі згідно з [8, 11] отримано низку залежностей повної собівартості ОК з різною структурою від параметрів його конструкції (кількості ОВ, ОМ, повивів тощо), що дозволяють на етапі проектування кабелю прискорити обґрунтований вибір структури його осердя (кількість трубок ОМ в першому повиві, кількість ОВ в ОК, кількість повивів) з одночасним забезпеченням необхідної ємності ОВ та мінімізувати собівартість ОК.

2. В ході досліджень було встановлено, що:

– збільшення кількості трубок ОМ до максимального значення в першому повиві одно- та двоповивному осерді ОК є недоцільним, оскільки перехід до більшої кількості повивів з меншою кількістю ОМ в I повиві кабелю дозволить отримати більш економічно вигідну конструкцію кабелю при одночасному забезпеченні заданого загального числа ОВ. Тому, використання в першому повиві одноповивного ОК 10, 11 та 12 елементів є економічно недоцільним, а в двоповивному ОК – 9, 10, 11 та 12 елементів. Таке твердження справедливе за умови рівності діаметрів усіх трубок ОМ;

– збільшення кількості повивів та трубок ОМ в осерді ОК призводить до зменшення витрат на матеріали конструктивних елементів кабелю віднесеного на одне оптичне волокно. А саме, в роботі встановлено, що для триповивної конструкції осердя ОК збільшення кількості волокон перестає спричиняти зміну параметра-критерію економічної ефективності за кількістю ОВ, тобто мало впливає на збільшення собівартості кабелю.

3. Отримані в даній роботі результати, встановлені факти та твердження можна рекомендувати для застосування в процесі прискореного вибору структури осердя кабелю на етапі його проектування з одночасним забезпеченням необхідної ємності ОК оптичними волокнами та мінімізації собівартості.

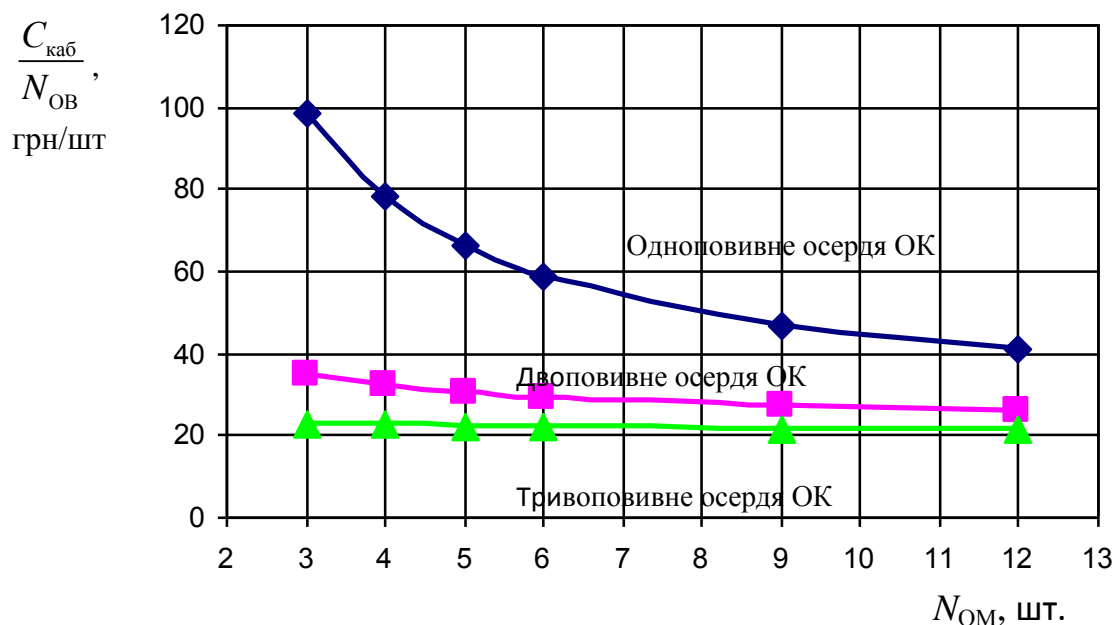


Рисунок 4 – Залежність параметра-критерію економічної ефективності конструкції ОК від кількості елементів першого повиву

ЛІТЕРАТУРА

1. Практика внедрения пассивных оптических сетей (PON) // DEPS. –<http://deps.ua/knowegable-base-ru/articles/item/462-praktika-vnedrenija-passivnyh-opticheskikh-setej-pon.html>, 2015.
2. Архитектура оптических сетей доступа FTTH (Fiber-to-the-Home) // Cisco. – https://www.cisco.com/web/RU/downloads/Cisco_FTTH_architecture.pdf, 2015.
3. Каталог кабелів фірми Fujikura, 2015.
4. Каталог кабелів фірми OFS, Loose Tube Fiber Optic Cable, 2014.
5. Каталог кабелів фірми Sumitomo Electric Ltd, 2015.
6. Каталог кабелів фірми , 2015.
7. Бондаренко О.В. Метод оптимізації багатомодульної конструкції осердя оптичних кабелів / О.В. Бондаренко, Д.М. Степанов, Г.А. Боярова // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2013. – Вип. № 1. – С. 99–06.
8. Бондаренко О.В. Оптимізація багатомодульної конструкції осердя оптичних кабелів за критерієм мінімальної собівартості / Бондаренко О.В., Степанов Д.М., Ромашченко В.В., Боярова А.А // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2014. – Вип. № 2. – С. 36 –43.
9. Мальке Г. Волоконно-оптические кабели: Основы проектирования кабелей, планирование систем / Г. Мальке, П. Гессинг. – Новосибирск: Издатель, 1997. – 264 с.
10. Волоконно-оптические кабели. Теоретические основы, конструирование и расчет, технология производства и эксплуатация: [монография] / [Иоргачев Д.В., Бондаренко О.В., Дашенко А.Ф., Усов А.В.]. – Одесса: Астропринт, 2000. – 536 с. – ISBN 966-549-542-9.
11. Бондаренко О.В. Методологічні аспекти розрахунку повної собівартості волоконно-оптичного кабелю / О.В. Бондаренко, П.П. Воробієнко, В.А. Коляденко, Н.Ю. Потапова-Сінько // Науково-теоретичний журнал Хмельницького економічного університету «Наука й економіка». – Хмельницький, 2013. – № 1 (29). – С. 164–172.

REFERENCES

1. DEPS. "Praktika vnedrenija passivnyh opticheskikh setej (PON)." 2015. Web. 16 May 2016 <<http://deps.ua/knowegable-base-ru/articles/item/462-praktika-vnedrenija-passivnyh-opticheskikh-setej-pon.html>>.
2. Gasymov, I. Arhitektura opticheskikh setej dostupa FTTH. Cisco, 2015. Web. 16 May 2016 <https://www.cisco.com/web/RU/downloads/Cisco_FTTH_architecture.pdf>.
3. Katalog kabeliv firmy Fujikura, 2015. CD.
4. Katalog kabeliv firmy OFS, Loose Tube Fiber Optic Cable, 2014. CD.
5. Katalog kabeliv firmy Sumitomo Electric Ltd, 2015. CD.
6. Katalog kabeliv firmy Corning, 2015. CD.
7. Bondarenko, O. V., D. M. Stepanov, and H. A. Boiarova "Metod optymizatsii bahatomodulnoi konstruksii oserdia optychnykh kabeliv." Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova 1 (2013): 99–106. Print.
8. Bondarenko, O.V., D. M. Stepanov, V. V. Romashchenko, and H. A. Boiarova "Optymizatsiia bahatomodulnoi konstruksii oserdia optychnykh kabeliv za kryteriiem minimalnoi sobivartosti." Naukovi pratsi ONAZ im. O.S. Popova 2 (2014): 36–43. Print.
9. Malke, G., and P. Gessing "Volokonno-opticheskie kabeli: Osnovy proektirovaniya kabelej, planirovanie sistem" Novosibirsk: Izdatel, 1997. Print.
10. Iorgachev, D. V., O. V. Bondarenko, A. F. Daschenko, and A. V. Usov "Volokonno-opticheskie kabeli. Teoreticheskie osnovy, konstruirovaniye i raschet, tehnologiya proizvodstva i jekspluatatsiya" Odessa: Astroprint, 2000. Print.
11. Bondarenko, O. V., P.P. Vorobiienko, V.A. Koliadenko, and N.Yu. Potapova-Sinko "Metodolohichni aspekty rozrakhunku povnoi sobivartosti volokonno-optychnoho kabeliu" Naukovo-teoretichni zhurnal Khmelnytskoho ekonomichnoho universytetu "Nauka y ekonomika" 1 (2013) 164–172. Print.