
ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

УДК 621.373.826

С.М. ЦИРУЛЬНИК

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ДИНАМІЧНОМУ ОПТИЧНОМУ ОПЕРАТИВНОМУ ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧОМУ ПРИСТРОЮ НА ВОЛЗ

*Вінницький національний технічний університет
95, Хмельницьке шосе, Вінниця, 21021, Україна*

Аннотация. Разработана сигнальная модель функционирования динамической памяти на ВОЛС. Полученные передаточные функции позволяют проанализировать световую энергетическую эффективность динамической памяти на ВОЛС.

Анотация. Розроблена сигнальна модель функціонування динамічної пам'яті на ВОЛЗ. Отримані передаточні функції дозволяють проаналізувати світлову енергетичну ефективність динамічної пам'яті на ВОЛЗ.

Abstract. The signal model of functioning of dynamic memory on fiber-optic communication line is developed. The got transmissions functions allow analyzing light power efficiency of dynamic memory on fiber-optic communication line.

ВСТУП

Нейронна мережа містить пам'ять, яку можна розділити на короткочасну та довготривалу [1]. Короткочасна пам'ять забезпечує збереження невеликої інформації, завантажується швидко, час збереження – до 30 секунд. Довготривала пам'ять представляє собою постійну пам'ять з тривалим часом зберігання бази знань. Короткочасну пам'ять можна розглядати як аналог оперативної пам'яті. Одним з найпростіших способів побудови короткочасної пам'яті є застосування часових затримок, які можна реалізувати на оптичній елементній базі – ВОЛЗ [2].

1. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В ДООЗП НА ВОЛЗ

В якості динамічного оптичного оперативного запам'ятовуючого пристрою (ДООЗП) використовується кільце ВОЛЗ, по якому циркулюють світлові імпульси та два відгалужувача (В) для введення та виведення оптичної інформації (рис. 1).

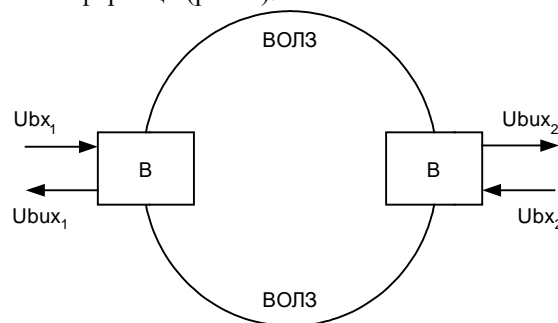


Рис. 1. Структурна схема базового елемента ДООЗП

Вихідний сигнал елемента затримки дорівнює вхідному сигналу, який затриманий на одиницю часу. В випадку дискретного вхідного сигналу $f(k)$ вихідний сигнал буде мати вид $f(k-1)$, де k – часовий індекс. Блок–схема та імпульсна характеристика (відгук по інтенсивності на вхідний імпульсний сигнал) показані на рис. 2 а. Передбачається, що показник переломлення в волокні складає величину порядку 1,5 й отримаємо затримку при розповсюдженні біля 5нс/м. Для відводу світових сигналів можна скористатись різними пристроями – направленими відгалужувачами, згинами світловодів [3, 4]. Математично вихідний сигнал відрізняється від вхідного в K раз, де K – деяка постійна (рис. 2.15 б).

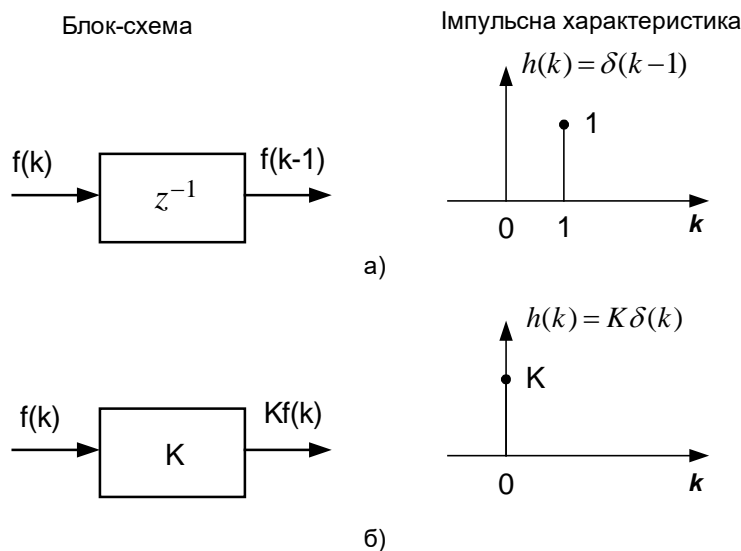


Рис. 2. Блок схема та імпульсна характеристика: (а) елемента затримки, (б) елемента відгалуження

На основі одномодового світловоду й направлених відгалужувачів можна створити динамічний оптичний елемент пам'яті (ДООП) – ДООЗП (рис. 3, а). ДООП (базовий елемент ДООЗП) складається з одномодового волоконно-оптичного контуру (з затримкою T), який замкнутий сам на себе через два направлених відгалужувача, причому частина світла з другого відгалужувача через волоконний контур поступає назад на перший відгалужувач. В наслідок цього оптичні сигнали, що поступили на вхід X_1 почнуть багаторазово циркулювати в контурі й при цьому будуть частково попадати на виходи Y_1, Y_2 . Імпульсна характеристика такої системи складається з ряду спадаючих максимумів, які знаходяться на однаковій відстані один від одного в часі на величину затримки в контурі T (рис. 3, б).

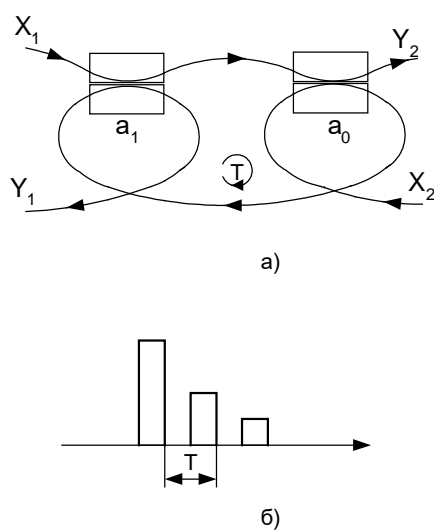


Рис. 3. Схема рециркуляційної лінії затримки з двома відгалужувачами (а), імпульсна характеристика рециркуляційної лінії затримки з двома відгалужувачами (б)

Зв'язок між виходом та входом направленого відгалужувача (рис. 4) можна описати

комплексною передаточною матрицею розміром 2x2

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = (\gamma)^{1/2} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де (E_1, E_2) та (E_3, E_4) комплексні амплітуди векторів напруженості E_1, E_2, E_3, E_4 відповідно на вході та виході відгалужувача, при чому для простоти припускається, що поляризація поля в усіх випадках однакова. Характеристики відгалужувача дуже мало залежать від поляризації поля на вході [5]. Оскільки відгалуженням назад можна знехтувати, то матрицю можна представити як добуток деякого загального амплітудного коефіцієнту пропускання $(\gamma)^{1/2}$ ($0,9 < \gamma < 1$) й унітарної матриці. Для унітарної матриці справедливі співвідношення:

$$|A|^2 + |B|^2 = |C|^2 + |D|^2 = 1, \quad (2)$$

$$CA^* + DB^* = 0,$$

де зірочка означає комплексно спряжену величину.

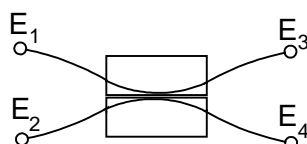


Рис. 4. Схема волоконно-оптичного направленного відгалужувача

В випадку симетричного відгалужувача $A=D, B=C$ співвідношення (1) може бути переписано в вигляді

$$\begin{pmatrix} E_3 \\ E_4 \end{pmatrix} = (\gamma)^{1/2} \begin{pmatrix} \sqrt{1-K} & j\sqrt{K} \\ j\sqrt{K} & \sqrt{1-K} \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де \sqrt{K} – коефіцієнт зв'язку по амплітуді, $j = \sqrt{-1}$ означає зсув фази сигналу на 90° .

При використанні некогерентного джерела зв'язок між інтенсивністю сигналу на вході та виході можна представити наступним виразом:

$$\begin{pmatrix} I_3 \\ I_4 \end{pmatrix} = (\gamma) \begin{pmatrix} 1-K & K \\ K & 1-K \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де (I_1, I_2) та (I_3, I_4) – інтенсивність сигналу відповідно на вході та виході відгалужувача, γ – загальний коефіцієнт пропускання по інтенсивності, K – коефіцієнт зв'язку по інтенсивності.

Для дослідження процесів в ДООЗП застосуємо метод Z – перетворень [6]. Його застосування виправдовується тим, що система, яка розглядається, по-перше, лінійна й інваріантна в часі, по-друге, дискретна в часі. Останнє обумовило можливість введення деякої базової затримки на час T , по відношенню до якої інші затримки будуть виражатись кратними числами. Іншими словами, імпульсна характеристика системи складається з ряду максимумів, що знаходяться на однаковій відстані. Це дозволяє спростити математичний аналіз припустивши, що сигнали в системі існують лише в дискретні моменти часу. Оскільки в цьому випадку сигнали на вході та виході описуються дискретними миттєвими значеннями, то такі системи називаються дискретними або імпульсними.

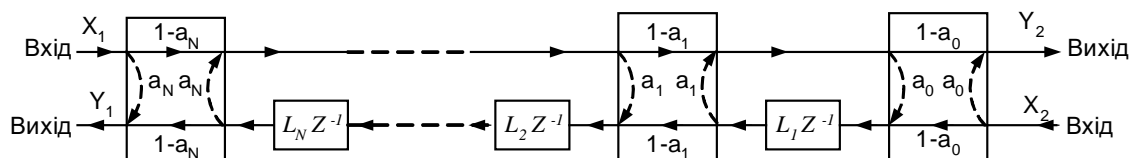


Рис. 5. Еквівалентна схема волоконно-оптичної структури N-го порядку з $(N+1)$ відгалужувачем та N елементами затримки (L – коефіцієнт пропускання по інтенсивності в відповідній ланці)

Математичний аналіз імпульсних систем в основному аналогічний аналізу безперервних систем,

але в той же час простіше й фізично більш наочний.

Z-образ $F(z)$ сигналу $f(k)$ визначається як результат Z-перетворення:

$$F(z) \square \sum_{k=-\infty}^{\infty} f(k)z^{-k}, \quad (5)$$

де k – часовий індекс, який дорівнює деякому кратному числу від базового часу затримки T ($k = nT$); z – змінна перетворення, яка представляє собою одиницю часового випередження (z^{-1} відповідає одиниці запізнення).

Зв'язок між вхідними та вихідними сигналами описується передаточною функцією системи, яка дорівнює відношенню Z-образу вихідного сигналу до Z-образу сигналу на вході. Частотну характеристику системи можна обчислити, якщо підставити в передаточну функцію значення $z = e^{j\omega T}$, що визначає коло одиничного радіусу з центром на початку координат на Z-площині. Для стійкості системи всі полюса її передаточної функції повинні знаходитись в середині кола одиничного радіусу. Пам'ять на ВОЛЗ стійка, якщо вона не містить елементів, що дають підсилення.

Застосовуючи визначення Z – перетворення (5), знайдемо вираз для передаточної функції $H(z)$ реціркулярної лінії затримки з двома відгалужувачами (рис. 3).

а) Для системи, у якої входом є X_1 , а виходом $-Y_1$

$$H_{11}(z) = \frac{a_1 + (1 - 2a_1)a_0 l_1 z^{-1}}{1 - a_1 a_0 l_1 z^{-1}}, \quad (6)$$

де a_1 та a_0 – коефіцієнти зв'язку відгалужувача по інтенсивності; l_1 – коефіцієнт пропускання контуру системи по інтенсивності.

Як видно з (6) система має єдиний нуль, що розташований в

$$z = \frac{(2a_1 - 1)}{a_1} a_0 l_1,$$

а також єдиний полюс в точці $z = a_1 a_0 l_1$.

б) Для системи, у якої входом є X_1 , а виходом $-Y_2$

$$H_{21}(z) = \frac{(1 - a_1)(1 - a_0)l_{11}}{1 - a_1 a_0 l_1 z^{-1}}, \quad (7)$$

де l_{11} – коефіцієнт пропускання світловоду по інтенсивності в каналі прямого зв'язку. Система містить один нуль на початку координат, а також один полюс в точці $z = a_1 a_0 l_1$.

Розглянемо лінійну інваріантну в часі систему з двома портами, кожний з яких містить два входи. На першому та другому портах присутні сигнали (X_1, Y_1) та (X_2, Y_2) в відповідності з рис.6.

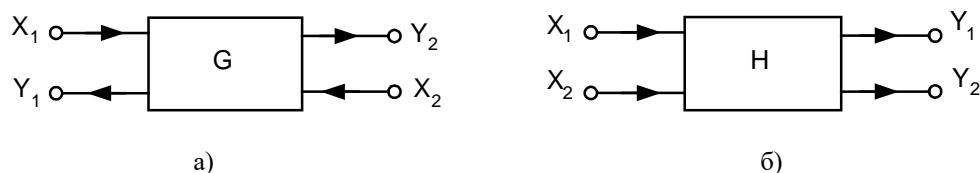


Рис. 6. Двопарна система: (а) схема з зворотнім зв'язком, (б) схема з прямим зв'язком

Таку структуру назовемо двоохпарною системою з зворотнім зв'язком. Якщо на першому та другому портах присутні сигнали (X_1, X_2) та (Y_1, Y_2) , то таку систему назовемо двоохпарною системою з прямим зв'язком. Вхідні (X) та вихідні (Y) змінні зв'язані одна за одною з допомогою передаточної матриці:

$$\begin{pmatrix} Y_1(z) \\ Y_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11}(z) & H_{12}(z) \\ H_{21}(z) & H_{22}(z) \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} X_1(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix}, \quad (8)$$

де z є змінна Z – перетворення.

Функція $H_{mn}(z)$ в (8) є передаточною функцією, що зв'язує вхідну змінну X_n з вихідною змінною Y_m .

Для аналізу двохпарних систем з зворотнім зв'язком можна використати ланцюгову матрицю, яка зв'язує між собою пари змінних (X_1, Y_1) та (X_2, Y_2) :

$$\begin{pmatrix} X_1(z) \\ Y_1(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) \end{pmatrix} \bullet \begin{pmatrix} Y_2(z) \\ X_2(z) \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Як передаточна та ланцюгова матриця мають розміри 2×2 й однозначно визначені для завдання вхідних та вихідних змінних. Елементи передаточної матриці для двохпарної системи з зворотнім зв'язком зв'язані з елементами ланцюгової матриці для тієї ж системи наступними співвідношеннями:

$$H_{11} = \frac{G_{21}}{G_{11}}, \quad H_{12} = \frac{G_{11}G_{12} - G_{12}G_{21}}{G_{11}}, \quad H_{21} = \frac{1}{G_{11}}, \quad H_{22} = \frac{G_{12}}{G_{11}}. \quad (10)$$

Якщо виконується умова $G_{11}G_{22} - G_{12}G_{21} = 1$, то система називається взаємно зворотною. В випадку касадно-з'єднаних двохпарних систем з зворотнім зв'язком ланцюгова матриця складової системи дорівнює добутку ланцюгових матриць окремих:

$$G_{total} = G_1 G_2 G_3 \dots G_N. \quad (11)$$

Аналогічне правило добутку матриць, але взятих з зворотнім порядком, справедливо й для передаточної матриці двохпарної системи з прямим зв'язком:

$$H_{total} = H_N \dots H_3 H_2 H_1. \quad (12)$$

Для направленої відгалужувача з коефіцієнтом зв'язку a передаточна матриця Hc та ланцюгова матриця Gc задаються наступними виразами:

$$Hc = \begin{pmatrix} 1-a & a \\ a & 1-a \end{pmatrix}, \quad (13)$$

$$Gc = \frac{1}{1-a} \begin{pmatrix} 1 & -a \\ a & 1-2a \end{pmatrix}, \quad (14)$$

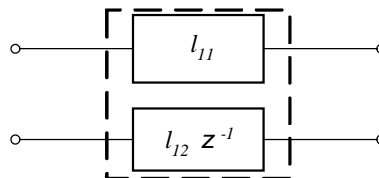


Рис. 7. Спрощена система затримки з двома лініями, де l_{11} та l_{12} – коефіцієнт пропускання по інтенсивності першої та другої волоконної лінії, а z^{-1} – одиничний час затримки

Аналогічно для матриць найпростішої системи з двох ліній затримки з одиничним часом затримки z^{-1} та коефіцієнтом пропускання по інтенсивності l_{11}, l_{12} (рис. 7):

$$Hd = \begin{pmatrix} l_{11} & 0 \\ 0 & l_{12}z^{-1} \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$Gd = \frac{1}{l_{11}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & l_{11}l_{12}z^{-1} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

ДООП (лінія затримки з двома відгалужувачами) представляє собою одночасно два касадно з'єднаних відгалужувача та лінію з двома елементами затримки. Тому на основі виразів (11) – (16) можна обчислити ланцюгову матрицю рециркуляційної лінії затримки та передаточну матрицю лінії затримки з двома відгалужувачами:

$$Gb = Gc_1 \bullet Gd \bullet Gc_0 = \frac{1}{l_{11}(1-a_1)(1-a_0)} \bullet \begin{pmatrix} G'_{11} & G'_{21} \\ G'_{12} & G'_{22} \end{pmatrix}, \quad (17)$$

де

$$\begin{cases} G'_{11} = 1 - a_1 a_0 l_1 z^{-1} \\ G'_{12} = -a_0 - a_1 (1 - 2a_0) l_1 z^{-1} \\ G'_{21} = a_1 + (1 - 2a_1) a_0 l_1 z^{-1} \\ G'_{22} = -a_1 a_0 + (1 - 2a_1)(1 - 2a_0) l_1 z^{-1} \end{cases}, \quad (18)$$

а $l_1 = l_{11}$ l_{12} є коефіцієнт пропускання контуру по інтенсивності, G_{c_1} та G_{c_0} – ланцюгові матриці відгалужувача (вираз (14)) з коефіцієнтом зв'язку a_1 та a_0 , G_d – ланцюгова матриця двохелементної лінії затримки, яка задана виразом (16). Крім того елементи, що відповідають передаточній матриці можуть бути знайдені з виразу (10):

$$Hb = Hc_1 \bullet Hd \bullet Hc_0 = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$\begin{cases} H_{11} = (1 - b_1)(1 - b_0) l_{11} + b_1 b_0 l_{12} z^{-1}; \\ H_{12} = b_1 (1 - b_0) l_{11} + (1 - b_1) b_0 l_{12} z^{-1}; \\ H_{21} = (1 - b_1) b_0 l_{11} + b_1 (1 - b_0) l_{12} z^{-1}; \\ H_{22} = b_1 b_0 l_{11} + (1 - b_1)(1 - b_0) l_{12} z^{-1}. \end{cases} \quad (20)$$

Скористуємось приведеним підходом в поєднанні з методом Z -перетворень з метою отримання виразів загального виду для передаточних функцій структур, що досліджуються.

Узагальнена лінійна система n -го порядку з дискретним часом в сучасній теорії керування описується в просторі станів рівняннями переходів станів й вихідним виду

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k) x(k) + B(k) u(k); \\ y(k) = C(k) x(k) + D(k) u(k). \end{cases} \quad (21)$$

Заголовними буквами позначені матриці, малими літерами – вектори. В виразі (21) вектор $x(k)$ є n - мірний вектор стану, $u(k)$ – m -мірний вектор на вході, $y(k)$ p -мірний вектор на виході, а A , B , C , D – матриці відповідного розміру ($n \times n$), ($n \times m$), ($p \times n$), ($p \times m$). Для інваріантних до зсуву (в часі) систем вказані матриці не залежать від часу, а залежать від параметрів системи, таких як коефіцієнт зв'язку або коефіцієнту втраг.

В математичній моделі, що описується виразом (21), в загальному випадку передбачається наявність у системи m входів та p виходів. Якщо система має єдиний вхід та єдиний вихід, то вираз (21) прийме вид

$$\begin{cases} x(k+1) = A(k) x(k) + b(k) u(k); \\ y(k) = c^T(k) x(k) + d(k) u(k), \end{cases}, \quad (22)$$

де b та c є вектори, а d – скалярна величина.

Взявши в якості параметрів стану вихідні величини елементів затримки, отримаємо наступні вирази для матриць A , B , C , D , що описують структури N -го порядку з зворотнім зв'язком

$$A = \begin{pmatrix} a_1 a_0 l_1 & a_2 (1 - a_1) a_0 l_1 & \dots & a_N \prod_{k=1}^{N-1} (1 - a_k) a_0 l_1 \\ (1 - a_1) l_2 & a_2 a_1 l_2 & \dots & a_N \prod_{k=2}^{N-1} (1 - a_k) a_0 l_1 \\ 0 & \ddots & & a_N (1 - a_{N-1}) l_{N-1} \\ & & & (1 - a_{N-1}) \ln a_N a_{N-1} l_N \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} \prod_{k=1}^{N-1} (1 - a_k) a_0 l_1 & (1 - a_0) l_1 \\ \prod_{k=2}^{N-1} (1 - a_k) a_0 l_1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ (1 - a_N) a_{N-1} l_N & 0 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 - a_N \\ a_1 (1 - a_0) & a_2 (1 - a_1) (1 - a_0) & \dots & a_N \prod_{k=0}^{N-1} (1 - a_k) \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} a_N & 0 \\ \prod_{k=0}^N (1 - a_k) & a_0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

Вектори на вході та виході, а також вектор стану відповідають

$$u = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix} \quad Y = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{pmatrix} \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \end{pmatrix}. \quad (24)$$

Зростання індексів відповідає переміщенню ліворуч по схемі. Нескладно помітити, що всі елементи матриць та компоненти векторів являються позитивними величинами, це означає що система відноситься до позитивної оптичної системи. Теорія позитивних систем тісно пов'язана з теорією позитивних матриць, яка розвинута досить докладно [6], що дозволяє використовувати її результати для вивчення властивостей позитивних систем. Виходячи з моделі простору станів для лінійних систем, лінійна позитивна система визначається як лінійна система, параметри стану (а також вихідні сигнали) якої позитивні.

2. АНАЛІЗ СВІТЛОВОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАМ'ЯТІ НА ВОЛЗ

Втрати енергії в направлених відгалужувачах й оптичних волокнах, а також втрати із за множини виходів, приводять до появи внесених втрат, які не дорівнюють нулю. Представляє практичний інтерес, яка кількість світлової енергії буде досягати виходу.

Для розрахунку світлового потоку на виході при заданому потоці на вході застосуємо передаточну функцію системи $H(z)$, яка обчислюється за виразами (6, 7). Для цього достатньо врахувати, що світловий потік пропорційний нульовій складовій спектру ($f=0$) в смузі частот модуляції. В передаточній функції цій складовій відповідає $z = 1$ ($z = e^{j2\pi fT}$), отримаємо наступне співвідношення між значеннями світлового потоку на вході й виході системи:

$$P_o = [H(1)] P_i, \quad (25)$$

де P_o, P_i – світловий потік відповідно на виході та вході системи. Таким чином, відношення вихідного світлового потоку до вхідного дорівнює значенню передаточної функції при $z = 1$:

$$\eta \square \frac{P_o}{P_i} = H(1). \quad (26)$$

Для елемента пам'яті, який побудований на рециркуляційній лінії затримки з двома від

$$\eta_1 = \frac{a_1 + (1 - 2a_1)a_0 l_1}{1 - a_1 a_0 l_1}, \quad (27)$$

$$\eta_2 = \frac{(1 - a_1)(1 - a_0) l_{11}}{1 - a_1 a_0 l_1}, \quad (28)$$

де η_1 – ефективність в випадку, коли X_1 являється входом, а Y_1 виходом; η_2 – ефективність в випадку, коли X_1 являється входом, а Y_2 виходом; a_1, a_0 – коефіцієнти зв'язку відгалужувачів за інтенсивністю; l_1 – коефіцієнт пропускання кільця світловоду за інтенсивністю; l_{11} – коефіцієнт пропускання світловоду за інтенсивністю в каналі прямого зв'язку.

За формулами (27) та (28) були побудовані графіки залежності $\eta_1 = F(a_1)$ та $\eta_2 = F(a_2)$ при різних значеннях a_0 (рис.8-9).

З виразів (27), (28) та рис. 8, рис. 9 слідує, що з збільшенням a_0 та a_1 світловий потік на виході Y_2 зменшується, а на виході Y_1 зростає. Якщо використовувати перший направлений відгалужувач для введення інформаційної послідовності (вхід $X1$), а другий для виведення збереженої оптичної інформаційної послідовності (вивід $Y2$) згідно рис. 9, то коефіцієнти зв'язку відгалужувачів за інтенсивністю a_0 та a_1 повинні бути як можна меншими. Якщо використовувати перший направлений відгалужувач для введення інформаційної послідовності (вхід $X1$) та для виведення збереженої оптичної інформаційної послідовності (вивід $Y1$) згідно рис. 9, то коефіцієнти зв'язку за інтенсивністю першого відгалужувача a_1 повинні бути як можна більшим, а другого відгалужувача a_0 повинні бути як можна меншими.

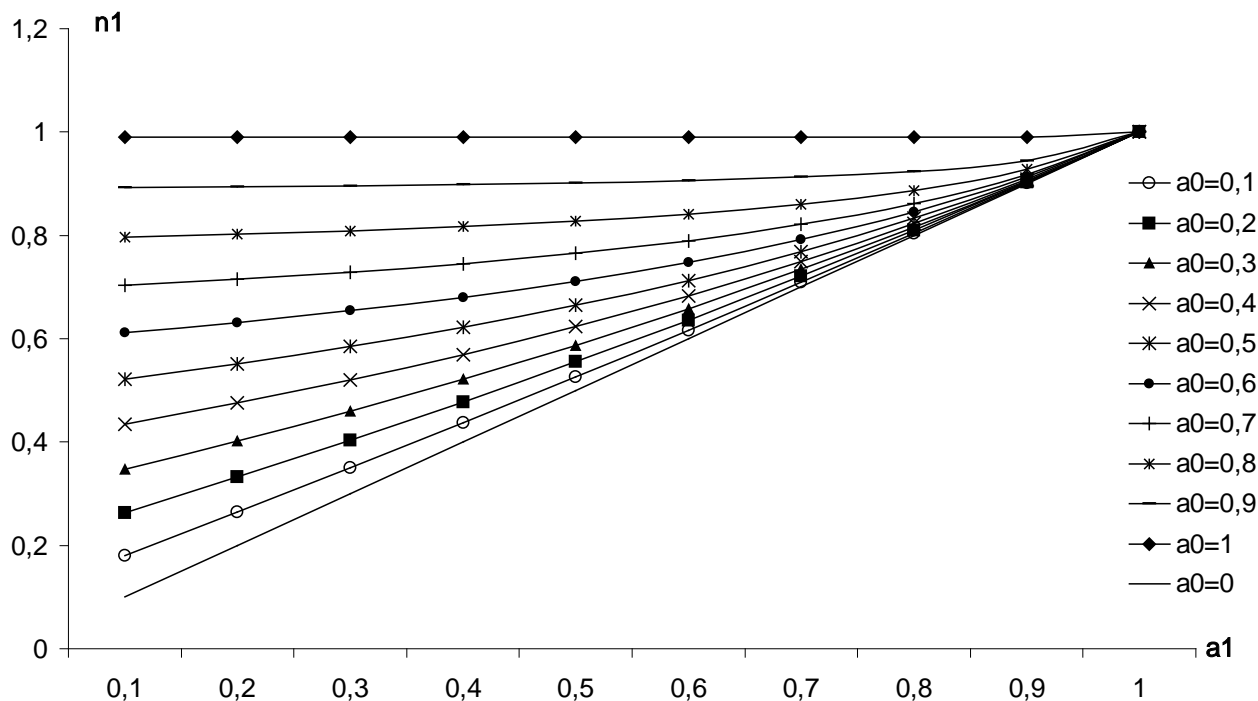


Рис. 8. Графік ефективності η_1 від коефіцієнту зв'язку a_1 при різних значеннях коефіцієнту зв'язку a_0 ($l_1=0.99$)

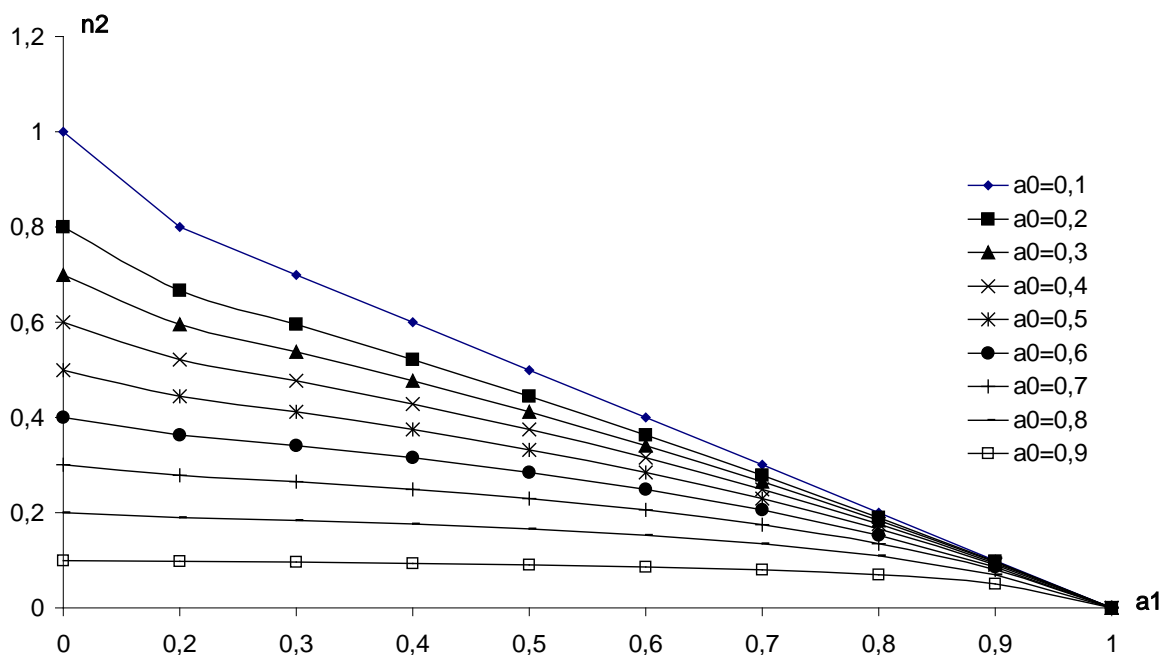


Рис.9. Графік ефективності η_2 від коефіцієнту зв'язку a_1 при різних значеннях коефіцієнту зв'язку a_0 ($l_1=0.99$).

ВИСНОВКИ

Математична модель функціонування динамічної оптоелектронної пам'яті на ВОЛЗ дозволяє оптимізувати характеристики модулів оптичної пам'яті при розробці проблемно-орієнтованих ДООЗП для надшвидкодійних оптичних інформаційно-обчислювальних систем, оптичних нейрокомп'ютерів, геоінформаційних енергетичних мереж

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. – 1104 с.
2. Кожем'яко В.П., Лисенко Г.Л., Цирульник С.М. Організація оперативної пам'яті багатofункціонального паралельного процесора // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2005. – №2(10). – С.80–86
3. Дмитриев С.А. Слепов Н.Н. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы. – М.: Изд. Connect, 2005.– 360с.
4. Скляр О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: СОЛОН-Р, 2001. –226с.
5. Мослехи Б., Гумен Дж., Тур М. Обработка сигналов решетчатыми волоконно-оптическими структурами.// ТИИСР.– 1984.– №7, т.72.– С.182-205.
6. Айфичер Э. С., Джервис Б. У. Цифровая обработка сигналов: практический подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.

Надійшла до редакції 10.10.2006 р.

ЦИРУЛЬНИК С.М. – пошукач кафедри лазерної та оптоелектронної техніки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна.

