

УДК 621.396

М.В. Кайдан, В.С. Андрущак

Національний університет "Львівська політехніка", Львів

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

В роботі проведено визначення і оцінку параметру енергоефективності транспортної оптичної мережі, яка працює на основі акустооптичних комутаторів та електрооптичних модуляторів. Показано вплив зміни орієнтацій зразка, які відповідають максимальним значенням оптичним коефіцієнтам, на енергоспоживання досліджуваних пристроїв в залежності від швидкості передачі даних. Визначення параметру енергоефективності здійснено для двох режимів передачі даних із врахування топологій транспортних оптичних мереж. Оцінка параметру енергоефективності виконана із використанням розроблених математичних і імітаційних моделей для досліджуваних пристроїв.

Ключові слова: енергоефективність, оптична транспортна мережа, акустооптичний комутатор, електрооптичний модулятор.

Вступ

На сьогоднішній день телекомунікаційне обладнання споживає близько 5% із загальної виробленої електричної енергії [1]. В свою чергу попит на телекомунікаційні послуги зростає і надалі, що призводить до зростання цього показника. Тому більш практичною метою є зменшення коефіцієнта зростання параметру енергоспоживання. Під цим параметром розуміємо затрачену кількість електроенергії, яка є необхідною для передачі одного біта інформації [2].

Ключовим підходом щодо зменшення коефіцієнта зростання параметру енергоспоживання є видалення проміжного оптоелектронного перетворення, тобто перехід до повністю оптичних мереж (ПОМ). Проте для роботи таких мереж необхідно розробити цілу низку як програмних так і апаратних рішень, узгодити режими передачі службового і інформаційного трафіку, забезпечити ефективне використання оптичних ресурсів мережі, забезпечити надійну роботу оптичних пристроїв. Одними із ключових таких пристроїв є оптичні комутатори і модулятори, зміна технічних параметрів яких буде суттєво впливати на роботу мережі в цілому. У зв'язку з тим, що енергетичне споживання мереж є важливішою проблемою у порівнянні з необхідною пропускну здатністю (оскільки енергетичне споживання є обмежуючим фактором [3]), тому є доцільність показати вплив зміни технічних параметрів оптичних модуляторів і комутаторів на їхнє енергетичне споживання та запропонувати методи підвищення енергоефективності досліджуваних мереж.

Для визначення параметру енергоспоживання нами було визначено основні фактори, які впливають на енергетичне споживання таких мереж [4], а саме: кількість та структура задіяних вузлів, вид транспортної технології, архітектура мережі, розмір блоку даних каналного рівня, тип використовувано-

го обладнання, кількість проміжних оптоелектронних перетворень, тип комутації, використання хвильових конверторів, кількість та вид регенераційних пунктів, кількість хвиль WDM систем. На основі даних параметрів сформовано математичну модель для визначення параметру енергоспоживання [5]. З використанням останньої розроблено імітаційну модель, яка дозволяє визначити параметр енергоспоживання для певної архітектури мережі із заданими відповідними її технічними параметрами [6].

В роботі для визначення параметру енергоефективності встановлено залежність параметру енергоспоживання від швидкості передачі даних в оптичному тракті. Виходячи із того, що маршрутизатор є найбільш енергоспоживаним пристроєм транспортних мереж [2], тому перш за все здійснено визначення параметру енергоефективності для цих пристроїв.

Визначення параметру енергоефективності для маршрутизатора транспортної оптичної мережі

В попередній роботі [6] було представлено енергоспоживання як граничних і проміжних вузлів транспортної оптичної мережі. Кожен з даних вузлів залежить від енергоспоживання пристроїв, які працюють на третьому рівні OSI - маршрутизаторів. В роботі [6] енергоспоживання пристроїв електричного домену визначається як:

$$P_{\text{equip.el(IP, tr.1)}} = \frac{P_{\text{max}}}{N}, \quad (1)$$

де P_{max} – затрата електроенергії пристроєм при його максимальному завантаженні, N – кількість блоків даних, яку може обробити пристрій (за 1 с).

Для маршрутизатора параметр енергоспоживання P_{max} визначається як [8]:

$$P_{\max}(V) = P_{\text{Chas}}(v) + \sum_{u=0}^U P_{\text{Proc}}(v_u) + \sum_{i=0}^N P_{\text{LC}}(v_i), \quad (2)$$

де V визначає тип шасі, процесора, встановлених лінійних карт, конфігурація і профіль трафіку пристрою в залежності від швидкості передачі даних в компонентах маршрутизатора. Функція $P_{\text{Chas}}(v)$ повертає енергетичне споживання шасі, U – кількість використовуваних процесорів, $P_{\text{Proc}}(v_u)$ повертає енергетичне споживання певного типу процесора, N – кількість використовуваних лінійних карт, $P_{\text{LC}}(v_i)$ визначає енергоспоживання всіх лінійних карт в базовій конфігурації (фізичних інтерфейсів, портових адаптерів, комутаційних фабрик і модулів управління). Елемент суми P_{LC} можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^N P_{\text{LC}}(v_i) &= \sum_{j=0}^J P_{\text{PLIM}}(v_j) + \\ &+ \sum_{m=0}^M P_{\text{SF}}(v_m) + \sum_{k=0}^K P_{\text{MSC}}(v_k), \end{aligned} \quad (3)$$

де $P_{\text{PLIM}}(v_j)$ – енергоспоживання інтерфейсних модулів і портових адаптерів (Physical Layer Interface Module (PLIM)), $P_{\text{SF}}(v_m)$ – енергоспоживання комутаційних фабрик (Switch Fabric (SW)), $P_{\text{MSC}}(v_k)$ – енергоспоживання модулів управління (Modular Services Card (MSC)).

Відповідно функцію, яка визначає енергоспоживання маршрутизатора можна представити у вигляді такої формули:

$$\begin{aligned} P_{\max}(V) &= P_{\text{Chas}}(v) + \sum_{u=0}^U P_{\text{Proc}}(v_u) + \\ &+ \sum_{j=0}^J P_{\text{MPA}}(v_j) + \sum_{m=0}^M P_{\text{FC}}(v_m) + \sum_{k=0}^K P_{\text{MSC}}(v_k). \end{aligned} \quad (4)$$

Збільшення швидкості передачі вимагає більш продуктивних і швидкодіючих елементів. При збільшенні швидкості передачі відбувається досить суттєве збільшення енергоспоживання процесора і лінійних карт маршрутизатора.

Шасі є найбільш енергоємним елементом таких маршрутизаторів. Воно може визначати до 80% їхнього енергоспоживання [8]. Енергоспоживання шасі визначається її відсотком заповнення лінійними картами (мається на увазі наскільки заповнено шасі – повністю чи частково). Для прикладу шасі Cisco CRS-3 24-Slot Fabric-Card Chassis [9] при завантаженні лише на третину споживає 3,244 кВт, а при повному – 7,66 кВт. Тобто підвищення швидкості передавання даних (використання лінійних карт з більш швидкісними інтерфейсами) не призведе до суттєвого підвищення енергоспоживання шасі. Це призведе до більш раціонального використання енергоресурсів таких маршрутизаторів.

Ключовим елементом в маршрутизаторі є центральний процесор (CPU). Для багатостійкових

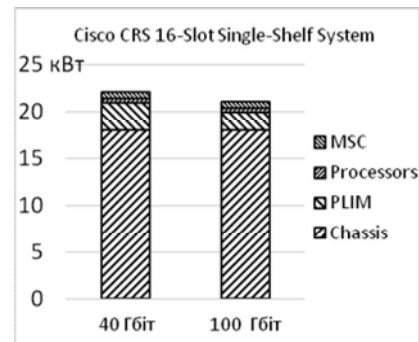
маршрутизаторів енергоспоживання процесорів визначає близько 2% від енергоспоживання стійки [10]. Проте в моноблочних маршрутизаторів це значення може становити до 45% [11]. Енергоспоживання мережевих CPU визначається сумою енергоспоживання наступних елементів: арифметично логічного пристрою (ALU), тактовим генератором, кешом і елементам пам'яті. Енергоспоживання кожного з такого елемента визначається такою формулою [12]:

$$P_{\text{elem}} = C \cdot V_{\text{dd}}^2 \cdot a \cdot f, \quad (5)$$

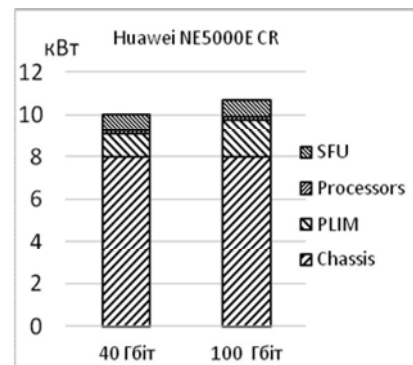
де C – агрегаційна ємність навантаження для кожного компонента, V_{dd} – робоча напруга, a – активність кожного елемента для кожного такту генератора ($0 \leq a \leq 1$), f – тактова частота процесора.

Очевидно, що збільшення швидкості передачі даних на інтерфейсах маршрутизатора ставить вищі вимоги до мережевого CPU. Це призводить до зростання параметру активності елементів - $a \rightarrow 1$ і до лінійного підвищення енергоспоживання CPU (5). Збільшення тактової частоти генератора також призводить до лінійного зростання енергетичного споживання процесора.

Енергоспоживання всіх лінійних карт в базовій конфігурації (фізичних інтерфейсів, портових адаптерів, комутаційних фабрик і модулів управління) визначається виробником обладнання. Наступні діаграми (рис. 1) показують зміну енергоспоживання маршрутизаторів (з врахуванням їх максимального завантаження і комплектації) при переході зі 40 до 100 Гб/с PLIM компаній Cisco [13] і Huawei [14].



а



б

Рис. 1. Енергоспоживання ядрових маршрутизаторів компаній а – Cisco; б – Huawei

Для лінійних карт Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System значення енергоспоживання зменшується при збільшенні швидкості передачі. Для Huawei ситуація є протилежною. Збільшення швидкості передачі даних в будь-якому випадку призведе до збільшення енергоспоживання цілої системи маршрутизатора. Проте як показують діаграми (рис. 1) **підвищення швидкості передачі в два рази не призведе до підвищення енергоспоживання стійки в два рази.** Наприклад для маршрутизатора Huawei зменшення кількості електроенергії що припадає на один Гігабіт швидкості становить до 57% (7,84 Вт/Гбіт – для 40 Гбіт PLIM, 3.34 Вт/Гбіт – для 100 Гбіт PLIM).

Оптичні модулятори і комутатори

Оптичні модулятори і комутатори визначають енергоспоживання пристроїв DWDM рівня. Як було встановлено в попередніх роботах [5, 6] – використання електрооптичного ефекту є кращим для оптичних модуляторів, а при акустооптичній взаємодії для оптичних комутаторів. Розглянемо залежність енергоспоживання акустооптичного комутатора від швидкості передачі даних.

Визначення параметру енергоефективності для акустооптичного комутатора

В роботі [15] досліджено архітектуру акустооптичного комутатора, який представлений на рис. 2.

Вхідна довжина хвилі, після виділення її на демультіплексорі, попадає на сплітер, який ділить даний оптичний сигнал. Одна частина сигналу потрапляє на контролер, який приймає рішення на основі таблиці комутації, в яке вихідне волокно необхідно скомутувати дану довжину хвилі. Контролер перевіряє, чи дана хвиля є вільною для встановленого вихідного волокна, тобто чи потрібно здійснювати хвильову конвертацію. Після цього контролер відсилає керуючий сигнал до генератора напруги, який в свою чергу прикладає керуючу напругу – для досягнення відповідного акустооптичної взаємодії. Це дозволяє безпосередньо скомутувати необхідну довжину хвилі у вихідне волокно. В якості акустооптичної комірки використано кристал ніобату літію.

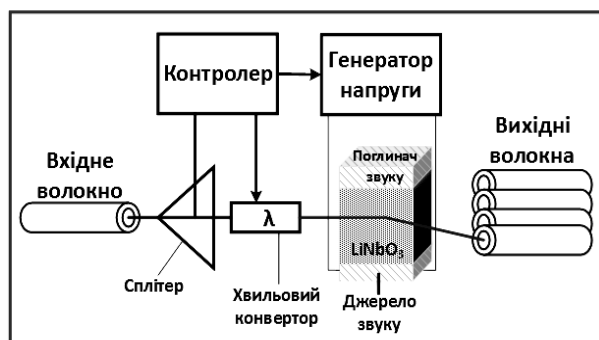


Рис. 2. Модель акустооптичного комутатора

Використання оптичних комутаторів є невід'ємними елементами у повністю оптичних мережах (ПОМ) [16]. Тому власне запропонована архітектура акустооптичного комутатора працює в двох режимах передачі даних – комутації транспортних модулів каналного рівня або комутації оптичних каналів з резервуванням відповідних часових і частотних ресурсів мережі. В першому режимі відбувається комутація кожного із блоків, метод реалізації якого описано в роботах [17, 18]. Другий режим передбачає здійснення комутації із волокна N у волокно M , довжини хвилі λ_N , на час t . Це дозволяє за час t скомутувати Q блоків без прийняття рішення для кожного із них, оскільки всі вони прямують до одного вузла призначення. Реалізація такого рішення також запропонована в роботах [17, 18].

Енергетичне споживання досліджуваного пристрою визначається за такою формулою:

$$P_{\text{switch}}(V) = P_{\text{proc}}(v) + P_{\text{genV}}(v) + P_{\text{wave}}(v) + P_{\text{cool}}(v), \quad (6)$$

де $P_{\text{proc}}(v)$ – енергоспоживання процесора (5), $P_{\text{genV}}(v)$ – енергоспоживання генератора напруги, $P_{\text{wave}}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на проведення хвильової конвертації, $P_{\text{cool}}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на охолодження комутатора,

$$P_{\text{cool}}(v) = k \cdot (P_{\text{proc}}(v) + P_{\text{genV}}(v) + P_{\text{wave}}(v)). \quad (7)$$

Як зазначено в роботі [20], при споживанні мережевим пристроєм 1 Вт електроенергії витрачається до 1 Вт електроенергії на його охолодження. Приймаємо параметр k в межах $0.5 \leq k \leq 1$, який визначає частку електроенергії, що припадає на його охолодження від сумарного енергоспоживання компонентів комутатора. Енергоспоживання генератора напруги $P_{\text{genV}}(v)$ визначається із загального означення потужності – добутку напруги і струму:

$$P_{\text{genV}}(v) = \int I \cdot U_{\text{manag}}(t) dt, \quad (8)$$

де відповідно значення керуючої напруги акустооптичного комутатора змінюється в діапазоні $0 < U_{\text{manag}} < U_{\text{acous}} \cdot U_{\text{acous}}$ – напруга генератора, яка необхідна для досягнення акустооптичної взаємодії і визначається за формулою:

$$U_{\text{acous}} = \frac{\lambda}{\pi \cdot f_p \cdot d_{ij} \cdot Q_m} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot H}{M_2 \cdot L \cdot 6,4 \cdot b \cdot l \cdot Z_{sn}}}, \quad (9)$$

λ – довжина хвилі, f_p – резонансна частота п'єзоперетворювача, d_{ij} – п'єзомодуль матеріалу п'єзоперетворювача, Q_m – механічна добротність п'єзоперетворювача, η – коефіцієнт передачі, H – висота ультразвукового п'єзоперетворювача, L – довжина акустичної взаємодії, M_2 – параметр акустичної якості, b і l – ширина і висота акустичного стовпа, Z_{sn} – акустичний опір матеріалу звукопроводу. Проведено моделювання (вхідні дані – табл. 1) для визначення енергоспоживання акустооптичного комутатора в залежності від швидкості передачі даних.

Таблиця 1

Вхідні дані для моделювання			
Параметр	Значення	Параметр	Значення
Процесор		Параметри кристалу і генератора	
Напруга, U	1,25 В	Акустичний опір матеріалу звукопроводу, Z_{sn}	29100 кг/с
Тактова частота, f	2,8 ГГц	Ширина акустичного стовпа, b	11 мм
Сукупна ємність навантаження (СЕН) ALU, C_{ALU}	310 пФ	Довжина акустичного стовпа, l	6 мм
СЕН тактового генератора, C_{clk}	3330 пФ	Довжина акустичної взаємодії, L	6 мм
СЕН кешу C_c	957 пФ	Коефіцієнт передачі, η	85%
СЕН кешу і шин C_{mchl}	0,088 фФ	Параметр акустооптичної якості, M_2	$7 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг $15,9 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг
Параметри п'єзоперетворювача			
Резонансна частота п'єзоперетворювача, f	18,5 МГц	Механічна добротність п'єзоперетворювача, Q	200
П'єзомодуль матеріалу п'єзоперетворювача, d_{ij}	17,1 м ² /В	Висота ультразвукового п'єзоперетворювача, H	1 мм
Параметри оптичного тракту			
Кількість волокон	4	Кількість оптичних хвиль в одному волокні	10

Отримано вплив зміни орієнтації зразка акустооптичного комутатора на основі досліджуваного параметру акустичної якості M_2 на енергетичне споживання цього пристрою. Оцінка параметру енергоефективності здійснюється відносно двох параметрів M_2 – відомої орієнтації зразка - $7 \cdot 10^{-15}$ с³/кг [20], і знайденого нами орієнтації - $15,9 \cdot 10^{-15}$ с³/кг [21]. Результати моделювання показують, що збільшення швидкості передачі даних призводить до збільшення енергетичного споживання комутатора. Збільшення швидкості передачі призводить до збільшення параметру активності елементів процесора – $a \rightarrow 1$.

В результаті моделювання отримано (табл. 2), що при збільшенні швидкості передачі даних від 10 до 100 Гбіт/с енергоспоживання процесора збільшилось на 69,4%, системи охолодження на 29,8%, генератора напруги не змінилось. Збільшення загального енергоспоживання відбулось майже на 130 Вт (при $M_2=7 \cdot 10^{-15}$ с³/кг).

При використанні акустооптичної комірки з параметром $M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с³/кг, енергоспоживання процесора при збільшенні швидкості передачі до 100 Гбіт/с збільшилось на 71,2%, системи охолодження на 36,9%, генератора напруги не змінилось. Збільшення загального енергоспоживання відбулось майже на 131Вт.

Як видно із рис. 3, а, б і табл. 2 зменшення енергоспоживання акустооптичного комутатора відбулось майже на 20% при використанні знайденої орієнтації зразка при якому параметр акустооптичної якості становить $M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с³/кг.

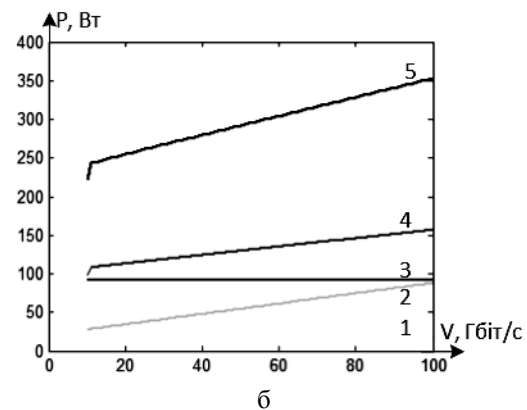
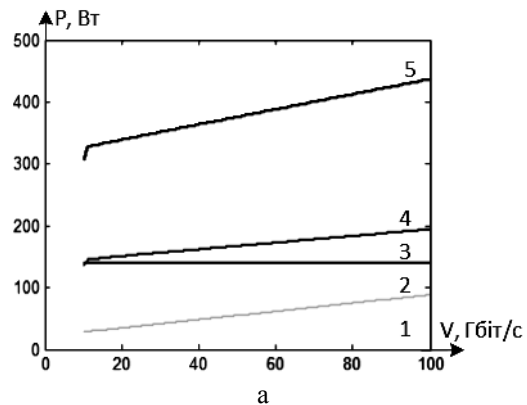


Рис. 3. Результати моделювання енергоефективності для а – $M_2=7 \cdot 10^{-15}$ с³/кг; б – $M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с³/кг, де відповідно енергетичне споживання:

- 1 – хвильових конверторів, 2 – процесора,
- 3 – генератора напруги акустооптичної комірки,
- 4 – охолодження, 5 – сумарне

Таблиця 2

Результати моделювання (при зміні орієнтації зразка комутатора)

Елем. комут.	Ен. спож., Вт	Елем. комут.	Ен. спож., Вт
$M_2=7 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг, швидкість 10 Гб/с		$M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг, швидкість 10 Гб/с	
$P_{proc}(v)$	26,9	$P_{proc}(v)$	25,3
$P_{gen}(v)$	138,6	$P_{gen}(v)$	89,2
$P_{wave}(v)$	4,6	$P_{wave}(v)$	4,5
$P_{cool}(v)$	136,1	$P_{cool}(v)$	98,7
$P_{switch}(v)$	306,3	$P_{switch}(v)$	222,1
$M_2=7 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг, швидкість 100 Гб/с		$M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг, швидкість 100 Гб/с	
$P_{proc}(v)$	87,8	$P_{proc}(v)$	87,9
$P_{gen}(v)$	140,5	$P_{gen}(v)$	91,9
$P_{wave}(v)$	15,8	$P_{wave}(v)$	15,9
$P_{cool}(v)$	193,9	$P_{cool}(v)$	156,6
$P_{switch}(v)$	436,2	$P_{switch}(v)$	352,4

Зменшення енергетичного споживання такого пристрою вдалось досягнути за рахунок того, що збільшення параметру акустичної якості M_2 призводить до зменшення керуючої напруги, яка є необхідна для досягнення акустооптичної взаємодії. В результаті це впливає на зменшення енергетичного споживання генератора напруги і комутатора в цілому.

Крім того, зменшення керуючої напруги акустооптичної комірки збільшить час життя даного кристалу і пристрою в цілому.

Також проведено моделювання, для оцінки параметру енергоефективності відносно кількості наскрізних каналів передачі даних в досліджуваному комутаторі.

В імітаційній моделі використано 5 наборів наскрізних каналів передачі. В результаті моделювання отримано, що при збільшенні кількості наскрізних каналів передачі від 0 до 15 відбувається зменшення енергетичного споживання процесора на 19% (рис. 4, а і табл. 3, 4).

Це пояснюється тим, що збільшення кількості наскрізних каналів призводить до зменшення кількості службових даних, яку обробляє процесор на один блок даних.

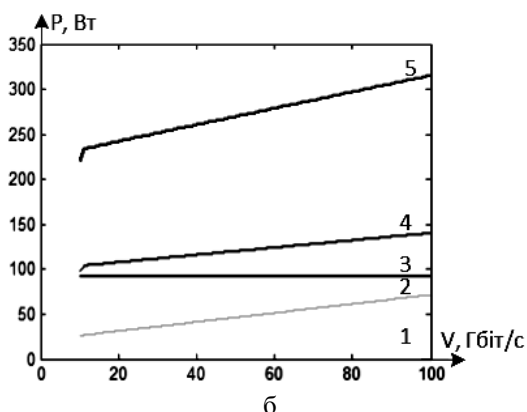
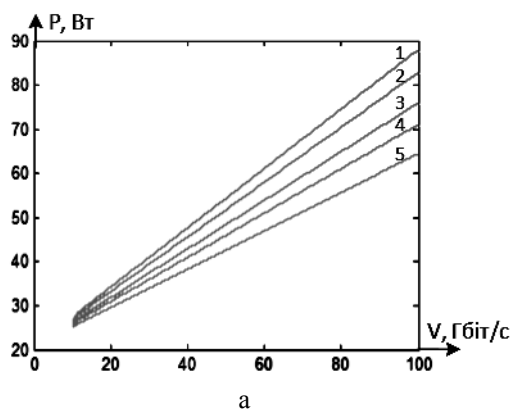


Рис. 4. Енергетичне споживання а – процесора акустооптичного комутатора при 1 – 0, 2 – 3, 3 – 7, 4 – 10, 5 – 15 наскрізних каналів передачі даних; б – всіх елементів комутатора 1 – хвильових конверторів, 2 – процесора, 3 – генератора напруги акустооптичної комірки, 4 – охолодження, 5 – сумарне

Таблиця 3

Результати моделювання (при зміні кількості наскрізних каналів передачі даних)

Елем. комут.	Ен. спож., Вт	Елем. комут.	Ен. спож., Вт
$M_2=15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, швидкість 10 Гб/с, 0 наскрізних каналів передачі		$M_2=15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, швидкість 10 Гб/с, 10 наскрізних каналів передачі	
$P_{\text{proc}}(\text{v})$	26,9	$P_{\text{proc}}(\text{v})$	25,5
$P_{\text{switch}}(\text{v})$	222,4	$P_{\text{switch}}(\text{v})$	220
$M_2=15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, швидкість 100 Гб/с, 0 наскрізних каналів передачі		$M_2=15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, швидкість 100 Гб/с, 10 наскрізних каналів передачі	
$P_{\text{proc}}(\text{v})$	87,9	$P_{\text{proc}}(\text{v})$	71,1
$P_{\text{switch}}(\text{v})$	352,5	$P_{\text{switch}}(\text{v})$	314,8

Таблиця 4

Результати моделювання (при зміні кількості наскрізних каналів передачі даних – енергоспоживання виключно для процесора)

Кількість наскрізних каналів передачі	Енергетичне споживання процесора при швидкості 10 Гбіт/с, Вт	Енергетичне споживання процесора при швидкості 100 Гбіт/с, Вт
0	26,9	87,8
3	26,5	82,7
7	25,9	75,9
10	25,5	71,0
15	24,9	64,4

При 15 таких каналів відбулось зменшення енергетичного споживання комутатора на 10,7%. Крім того, зменшення енергетичного споживання процесора збільшить час життя і термін надійної роботи пристрою. Відповідно при використанні знайденої орієнтації зразка, що характеризується параметром акустичної якості $M_2=15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ і використанні 15 наскрізних каналів передачі даних вдалось досягнути сумарного зменшення енергетичного споживання такого комутатора на 27,8%.

Вплив кільцевої топології транспортної мережі на енергетичне споживання акустооптичного комутатора

Проведено дослідження, як топологія транспортних оптичних мереж впливають на структури акустооптичних комутаторів і відповідно на їхнє енергоспоживання. Оскільки транспортні оптичні мережі в більшості випадків будуються за кільцевою топологією, тому власне вони піддалися дослідженню.

Проведено дослідження акустооптичних комутаторів для топології, представленої на рис 5.

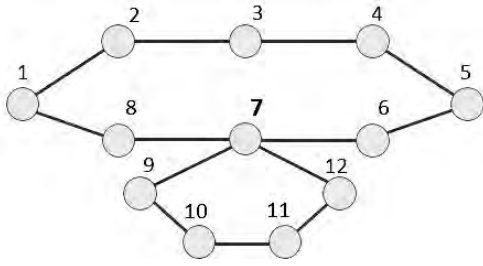
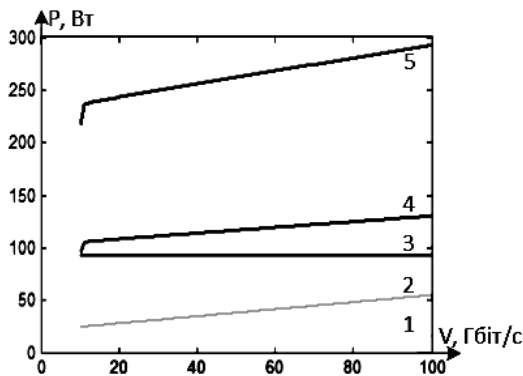


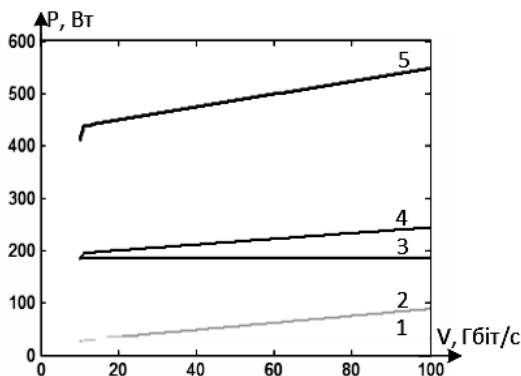
Рис. 5. Досліджувана топологія

В досліджуваній топології кожна лінія зв'язку (оптичний тракт) включає в себе по 4 оптичних волокна на прийом і передачу, кожне з яких містить в собі по 10 довжин хвиль. Відповідно всі вузли даної топології (рис. 5), які являються собою акустооптичні комутатори містять в собі по 4 порти входу/виходу. Структура таких комутаторів, енергетичне споживання його компонентів і пристрою в цілому визначається на основі вище описаного акустооптичного комутатора (див. табл. 3 – 4 і рис. 2). Проте виключенням тут є вузол 7. Для інших вузлів, які містять 4 вхідних/вихідних порти, вузол 7 містить 8 портів (рис. 5).

Тому проведено моделювання для оцінки енергоефективності вузла 7 (акустооптичного комутатора) у порівнянні з іншим вузлом (акустооптичним комутатором) даної топології.



а



б

Рис. 6. Енергетичне споживання акустооптичного комутатора при а – 4 вхідних/вихідних портах; б – 8 вхідних/вихідних портах

В результат моделювання отримано, що збільшення кількості вхідних/вихідних портів в 2 рази (з 4 до 8 вхідних/вихідних портів) призвело до збільшення енергетичного споживання акустооптичного комутатора на 87,16 відсотків. Найбільшою мірою збільшення кількості портів призвело до збільшення сумарного енергетичного споживання генераторів напруг акустооптичних комірок (табл. 5) за рахунок збільшення кількості самих комірок. Енергетичне споживання однієї такої комірки становить менше 3 Вт [22].

Таблиця 5

Результати моделювання

Елем. комут.	Ен. спож., Вт	Елем. комут.	Ен. спож., Вт
Швидкість 100 Гб/с, 4 вхідних/вихідних порти		Швидкість 100 Гб/с, 8 вхідних/вихідних порти	
$P_{proc}(v)$	54,4	$P_{proc}(v)$	87,9
$P_{genV}(v)$	91,9	$P_{genV}(v)$	183,9
$P_{wave}(v)$	15,8	$P_{wave}(v)$	31,8
$P_{cool}(v)$	129,8	$P_{cool}(v)$	243,0
$P_{switch}(v)$	292,1	$P_{switch}(v)$	546,7

Крім того, такі вузли (мається на увазі вузол 7 – оскільки при його аварії зупиниться робота двох кілець) для надійної роботи і підтримки необхідної якості обслуговування повинні характеризуватись повною доступністю вихідних портів. Це досягається за допомогою оптичних хвильових конверторів. Слід зазначити, що економія на хвильових конверторах не є суттєвою з точки зору енергоспоживання (табл. 5). В імітаційній моделі було використано конвертори, які базуються на чотирьоххвильовому змішуванні, які споживають до 0,5 Вт електроенергії [23]. Тобто використання хвильових конверторів не суттєво впливає на енергетичне споживання цілого пристрою тому є доцільність їх використання з точки зору енергоспоживання.

Визначення параметру енергоефективності для електрооптичного модулятора

ВОСПІ із швидкістю вище 10 Гбіт/с вимагають використання зовнішніх модуляторів[24 – 25]. Відповідно об'єктом дослідження стали зовнішні електрооптичні модулятори за запропонованою архітектурою пристрою на рис. 7. Досліджуваний електрооптичний модулятор складається з процесора, генератора напруги і електрооптичної комірки (лазер не є компонентом модулятора). В якості електрооптичної комірки використано кристал ніобату літію ($LiNbO_3$). Генератор напруги здійснює прикладання високої напруги (порядку кВ) до кристалу ніобату літію для досягнення електрооптичного ефекту. Процесор здійснює управління даним модулятором і

керуванням роботи генератором напруги. В залежності від значень вхідного сигналу (послідовності 1 і 0) процесор вирішує яке значення і знак напруги слід прикласти до електрооптичної комірки, щоб відіслати необхідний сигнал управління генератору напруги. Останній в свою чергу здійснює безпосереднє прикладання керуючої напруги до кристалу ніобату літію.

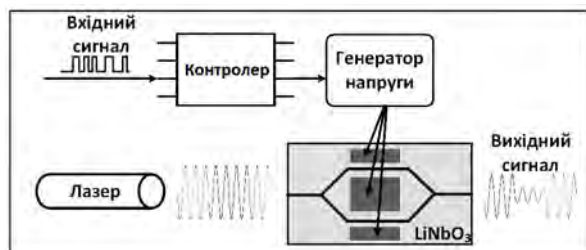


Рис. 7. Структурна схема досліджуваного електрооптичного модулятора

Виходячи із структури даного електрооптичного модулятора параметр енергоспоживання визначається формулою:

$$P_{\text{mod}}(V) = P_{\text{proc}}(v) + P_{\text{genV}}(v) + P_{\text{cool}}(v), \quad (10)$$

де $P_{\text{proc}}(v)$ – енергоспоживання контролера, яке визначається енергоспоживанням процесора (5), $P_{\text{genV}}(v)$ – енергоспоживання генератора напруги, $P_{\text{cool}}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на охолодження модулятора і визначається формулою:

$$P_{\text{cool}}(v) = k \cdot (P_{\text{proc}}(v) + P_{\text{genV}}(v)). \quad (11)$$

Відповідно енергоспоживання модулятора буде визначатись за формулою:

$$P_{\text{mod}}(V) = P_{\text{proc}}(v) + P_{\text{genV}}(v) + k \cdot (P_{\text{proc}}(v) + P_{\text{genV}}(v)). \quad (12)$$

Енергоспоживання генератора $P_{\text{genV}}(v)$ визначається із загального означення потужності - добутку напруги і струму. Напруга генератора, яка необхідна для досягнення електрооптичного ефекту визначається півхвильовою напругою за формулою:

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda \cdot d}{2 \cdot n^3 \cdot \gamma_{ij} \cdot L}, \quad (13)$$

де λ – довжина хвилі, d – товщина зразка, n – показник заломлення, γ_{ij} – електрооптичний коефіцієнт, L – довжина кристала.

Відповідно енергетичне споживання генератора напруги визначається за такою формулою:

$$P_{\text{genV}}(v) = \int I \cdot U_{\text{manag}}(t) dt. \quad (14)$$

Фізичним змістом цієї формули є те, що для модуляції значень «0» і «1» параметр керуючої напруги змінюється в межах $0 < U_{\text{manag}} < U_{\lambda/2}$ для симетричної структури електрооптичного модулятора на основі інтерферометра Маха-Цендера (рис. 7).

Енергоспоживання процесора визначається згідно його математичної моделі (5).

Здійснено моделювання з метою отримання залежності параметру енергоспоживання модулятора від зміни швидкості передачі даних (параметру енергоефективності).

Таблиця 6

Вхідні дані для моделювання

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Процесор		Параметри кристалу і генератора	
Напруга, U	1,25 В	Показник заломлення, n	2,2378
Тактова частота, f	2,8 ГГц	Довжина хвилі, λ	632,8 нм
Сукупна ємність навантаження (СЄН) ALU, C _{ALU}	310 пФ	Електрооптичний коефіцієнт, γ _{ij}	3,4*10 ⁻¹² м/В 39,7*10 ⁻¹² м/В
СЄН тактового генератора, C _{clk}	3330 пФ	Товщина зразка, d	13,4 мм
СЄН кешу C _c	957 пФ	Довжина зразка, L	18,5 мм
СЄН кешу і шин C _{mchl}	0,088 фФ	Значення струму генератора, I	20 мА

Моделювання проведено в діапазоні швидкостей від 10 до 100 Гбіт/с для двох значень електрооптичного коефіцієнту – $\gamma_{ij}=3,4*10^{-12}$ м/В [26] і для знайденого значення в нашій попередній роботі [7] – $\gamma_{ij}=39,7*10^{-12}$ м/В. Це здійснено з метою, щоб показати не тільки вплив зміни швидкості передачі, а й вплив зміни електрооптичного коефіцієнту на енергоспоживання модулятора в цілому.

Як видно із графіків рис. 8 збільшення швидкості передачі призводить до лінійного зростання енергетичного споживання електрооптичного модулятора. Енергоспоживання контролера (зелена крива) збільшується при підвищенні швидкості передачі даних за рахунок підвищення активності кожного елемента процесора. Відповідно а → 1, що в свою чергу призводить до зростання витрат електроенергії на його охолодження (голуба крива) і загальне енергоспоживання пристрою (синя крива). Енергоспоживання генератора напруги практично не змінюється при зміні швидкості передачі.

Як видно із результатів моделювання (табл. 7) при збільшенні швидкості передачі даних від 10 до 100 Гбіт/с енергоспоживання процесора збільшилось на 71,4%, системи охолодження на 21,1%, генератора напруги не змінилося.

Збільшення загального енергоспоживання відбулось на 32,4 Вт (при $\gamma_{ij}=3,4*10^{-12}$ м/В).

При використанні електрооптичної комірки з параметром $\gamma_{ij}=39,7*10^{-12}$ м/В, енергоспоживання процесора очевидно також збільшилось на 71,4% системи охолодження на 59,2%, генератора напруги не змінилось. Збільшення загального енергоспоживання відбулось на 32,3 Вт.

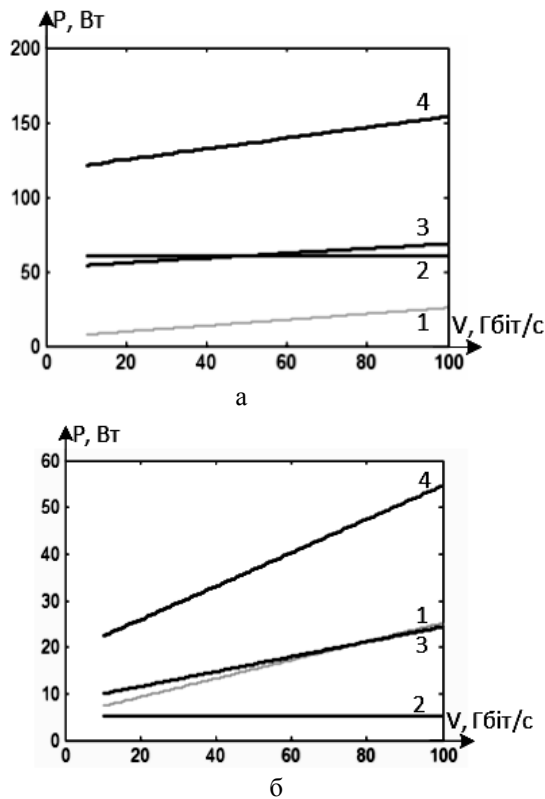


Рис. 8. Енергоспоживання електрооптичного модулятора і його компонентів в залежності від швидкості передачі даних при а – $\gamma_{ij}=3.4 \cdot 10^{-12}$ м/В; б – $\gamma_{ij}=39.7 \cdot 10^{-12}$ м/В де енергетичне споживання 1 – процесора, 2 – генератора напруги електрооптичної комірки, 3 – охолодження, 4 – сумарне

Таблиця 7

Результати моделювання

Елем. модул.	Ен. спож., Вт	Елем. модул.	Ен. спож., Вт
$\gamma_{ij}=3.4 \cdot 10^{-12}$ м/В, швидкість 10 Гб/с		$\gamma_{ij}=39.7 \cdot 10^{-12}$ м/В, швидкість 10 Гб/с	
$P_{proc}(v)$	7,2	$P_{proc}(v)$	7,2
$P_{genV}(v)$	60,1	$P_{genV}(v)$	5,1
$P_{cool}(v)$	53,8	$P_{cool}(v)$	9,9
$P_{switch}(v)$	121,1	$P_{switch}(v)$	22,3
$\gamma_{ij}=3.4 \cdot 10^{-12}$ м/В, швидкість 100 Гб/с		$\gamma_{ij}=39.7 \cdot 10^{-12}$ м/В, швидкість 100 Гб/с	
$P_{proc}(v)$	25,2	$P_{proc}(v)$	25,2
$P_{genV}(v)$	60,1	$P_{genV}(v)$	5,1
$P_{cool}(v)$	68,2	$P_{cool}(v)$	24,3
$P_{switch}(v)$	153,5	$P_{switch}(v)$	54,6

Як видно із рис. 8, а, б зменшення енергоспоживання електрооптичного модулятора відбулось на 64,4% при використанні електрооптичної комірки із параметром $\gamma_{ij}=39.7 \cdot 10^{-12}$ м/В. Збільшення значення електрооптичного коефіцієнта γ_{ij} (знаходження відповідної орієнтації зрізу кристалу) призводить до зменшення керуючої напруги, яка є необхідна для досягнення електрооптичного ефекту. Це призводить до зменшення енергетичного споживання гене-

ратора напруги і відповідно пристрою в цілому, що було отримано в даній роботі.

Висновок

В роботі представлено математичні і імітаційні моделі визначення параметру енергоефективності в залежності від зміни швидкості передачі даних для маршрутизатора, акустооптичного комутатора і електрооптичного модулятора.

Встановлено, що збільшення в два рази швидкості передачі даних не приведе до зростання енергетичного споживання у стільки ж разів, але вплине на підвищення параметру енергоефективності. Показано, що збільшення швидкості передачі даних призводить до більш раціонального використання енергоресурсів, хоча це викликає до зростання енергетичного споживання пристроїв мережі.

Визначено, що при використанні зрізу зразка, який відповідає максимальному значенню електрооптичного коефіцієнта відбувається зменшення енергетичного споживання електрооптичного модулятора на 64,4%. Для акустооптичного комутатора зменшення енергетичного споживання становить майже 20%. Використання наскрізних каналів передачі даних у акустооптичному комутаторі дає змогу зменшити енергетичне споживання на 10,7%. Для зрізу кристалу, що відповідає максимальному значенню параметру акустооптичної якості і при використанні наскрізних каналів передачі даних зменшується енергетичне споживання комутатора на 27,8%. Виявлено, що збільшення в два рази вхідних/вихідних портів акустооптичного комутатора для дослідженої топології мережі, призвело до збільшення енергетичного споживання такого пристрою на 88%.

Список літератури

1. GeSI, The Climate Group. Smart 2020: Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age [Electronic resource] // 2008. – Mode of access: WWW.URL: http://www.smart2020.org/_assets/files/02_smart2020Report.pdf.
2. Tucker R. Energy efficiency in cloud computing and optical networking / R. Tucker, K. Hinton, R. Ayre // ECOC 2012 Tutorial.IEEE Network. – March/April. – 2011. – P. 6.
3. Musumeci F. On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching / F. Musumeci, F. Vismara, V. Grkovic, M. Tornatore, A. Pattavina // IEEE international Conference (ICC'2011) – 2011. – P. 1-5.
4. Аналіз енергетичного балансу оптичної транспортної мереж на основі технологічних і архітектурних підходів / М.В. Кайдан, В.С. Андрущак, М.В. Піцик, В.З. Паукевич // Вісник НУ «Львівська політехніка». Радіоелектроніка і телекомунікації – 2015. – No 818. – С. 120-129.
5. Kaidan M. Calculation Model of Energy Efficiency in Optical Transport Networks / M. Kaidan, V. Andrushchak, M.Pitsyk // Proceedings of the Second International Scientific-Practical Conference (PICS&T' 2015). – 2015. – P. 167-170.
6. Кайдан М. Модель розрахунку енергоефективності для електро- та акустооптичних пристроїв у оптичній транспортній мережі / М. Кайдан В. Андрущак // In Proceeding of the 1 International Conference (AICT'2015). – С. 171-174.

7. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization / A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk, N.M. Demyanyshyn, M.V. Kaidan, O.V. Yurkevych, S.S. Dumych, A.V. Kityk, W. Schranz // *Optics & Lasers in Engineering*. – 2009. – V.47, N.1. – P. 24-30.

8. Chabarek J. Power awareness in network design and routing / J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford, C. Estan, D. Tsiang, S. Wright // *INFOCOM 2008. The 27th Conference on computer communications*. IEEE. – 13-18 April. – 2008.

9. Cisco Carrier Routing System. Cisco CRS-3 24-Slot Fabric-Card Chassis Data Sheet [Electronic resource] // *Data Sheet 2013*. – Mode of access: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/data_sheet_c78-408226.html.

10. Cisco Carrier Routing System. Cisco CRS 4-, 8-, and 16-Slot Line Card Chassis Performance Route Processors Data Sheet [Electronic resource] // *Data Sheet 2014*. – Mode of access: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/datasheet-c78-730789.html>.

11. Hinton Kery. Power consumption and energy efficiency in the internet / Kery Hinton, Jayant Baliga, Michael Feng, Robert Ayre, Rodney S. Tucker // *IEEE Network*. – March/April 2011. – P. 6.

12. Mark A. Franklin. Power considerations in network processor design / Mark A. Franklin, Tilman Wolf // *Network Processor Design: Issues and Practices*. – 2003. – № 2. – P. 29-50.

13. Cisco. Cisco Carrier Routing System – Data Sheets [Electronic resource] // *Data Sheet 2014*. – Mode of access: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/carrier-routing-system/datasheet-listing.html>.

14. Huawei. Huawei NE 5000E Cluster Router [Electronic resource] // *Product Brochure 2014*. – Mode of access: http://e.huawei.com/en/related-page/products/enterprise-network/routers/ne/ne5000e/brochure/Router_NE5000E.

15. Модель акустооптичного коммутатора для повністю оптичних телекомунікаційних систем / Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, В.З. Пашикевич // *Вісник НУ «Львівська політехніка» Радіоелектроніка і телекомунікації*. – 2013. – № 766. – С. 90-95.

16. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network / S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov // *Proc. IEEE International Conference on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, (CADSM 2013)*. – 2013. – P. 87.

17. Підвищення якості надання послуг у мультисервісних мережах шляхом інтеграції технологій IP/MPLS та DWDM / Б.М. Стрихалюк, П.О. Гуськов, В.С. Андрущак, В.Є. Мурак, С.М. Редчук // *Вісник НУ «Львівська політехніка*. – 2015. – № 818. – С. 94-103.

18. Метод підвищення ефективності використання мережевих ресурсів в інформаційно-телекомунікаційних систем / М.М. Климаш, О.М. Шпур, М.О. Селюченко, Б.В. Киричук, Т.В. Мельник // *Радіоелектроніка і телекомунікації*. – 2015. – No 818. – С. 137-150.

19. Idzikowski F. Power consumption of network elements in IP over WDM network // *TKN technical Reports Series – Berlin*. – 2009.

20. Балакиш В.И. Физические основы акустооптики [Текст] / В.И. Балакиш, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чурков. – М.: Радио и связь, 1985. – 280 с.

21. Spatial anisotropy of the acoustooptical efficiency in Lithium Niobate Crystals / A.S. Andrushchak, E.M. Chernykhivsky, Z.Yu. Gotra, M.V. Kaidan, A.V. Kityk, N.A. Andrushchak, T.A. Maksymyuk, B.G. Mytsyk, W. Schranz // *J. Applied Physics*. – 2010. – №.108. – P. 103118(1-5).

22. Wikipedia. Acousto-optic modulator [Electronic resource] // 2016. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator.

23. Kaminow I. Optical Fiber Telecommunications VB: Systems and Networks. / I. Kaminow, T. Li, A.E. Willner. – Elsevier, 2010. – 928 p.

24. Колодезная Г.В. Оптические системы передачи / Г.В. Колодезная. – Хабаровск: ДВГУПС, 2002. – 99 с.

25. Берикашвили В.Ш. Электрооптические модуляторы и фильтры на основе кольцевых микрорезонаторов для волоконно-оптических систем связи / В.Ш. Берикашвили, Н.Т. Ключник, М.Я. Яковлев // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*. – 2011. – №4. – С. 3-9.

26. Лопатина П.С. Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи / П.С. Лопатина, В.В. Криштон // *Изв.Вузов. Приборостроение*. – 2009. – Т.52. – №12. – С. 67-71.

Надійшла до редколегії 18.04.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.О. Можасв, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

М.В. Кайдан, В.С. Андрущак

В работе проведено определение и оценка параметра энергоэффективности транспортных оптических сетей, которые работают на основе акустооптических коммутаторов и электрооптических модуляторов. Показано влияние изменения ориентации образца, которые соответствуют максимальным значениям оптическим коэффициентам, на энергопотребление исследуемых устройств в зависимости от скорости передачи данных. Определение параметра энергоэффективности сделано для двух режимов передачи данных с учета топологий транспортных оптических сетей. Оценка параметра энергоэффективности выполнена с применением разработанных математических и имитационных моделей для исследуемых устройств.

Ключевые слова: энергоэффективность, оптическая транспортная сеть, акустооптический коммутатор, электрооптический модулятор.

THE DETERMINATION OF PARAMETER OF ENERGY EFFICIENCY FOR OPTICAL TRANSPORT NETWORKS

M.V. Kaidan, V.S. Andrushchak

In paper performed determination and assessment parameter of energy efficiency of optical transport networks that use acousto optic switches and electro-optic modulators. Presented the influence change the orientation of the sample, that correspond to a maximum value of optic coefficients, on energy consumption of researched devices in depending from speed of transfer data. The determination parameter of energy efficiency performed for two regimes of data transfer taking into account the topology transport optical networks. The assessment of energy efficiency performed with using developed mathematical and simulation models for researched devices.

Keywords: energy efficiency, optical transport network, acoustooptic switch, electro-optic modulator.