

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ З УРАХУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І АРХІТЕКТУРНИХ ПІДХОДІВ

© Кайдан М. В., Андрущак В. С., Піцик М. В., Пашкевич В. З., 2015

Описано основні підходи до підвищення енергоефективності телекомунікаційних мереж, а особливу увагу зосереджено на технологічних і архітектурних підходах. Встановлено, що визначальну частину енергозатрат становить проміжне оптоелектронне перетворення, а також робота ядрового маршрутизатора. Наведено перспективи використання повністю оптичних комутаторів і конверторів. На прикладі розрахунку показано, що енергоефективність транспортної оптичної мережі зросла на 63 % завдяки видаленню проміжного оптоелектронного перетворення.

Ключові слова: оптична мережа, споживана потужність, DWDM, оптичний перемикач.

M. V. Kaidan, V. S. Andrushchak, M. V. Pitsyk, V. Z. Pashkevych
Lviv Polytechnic National University

ANALYSIS OF THE ENERGY BALANCE OF OPTICAL TRANSPORT NETWORK BASED ON THE TECHNOLOGICAL AND ARCHITECTURAL APPROACHES

© Kaidan M. V., Andrushchak V. S., Pitsyk M. V., Pashkevych V. Z., 2015

In this paper presents the main approaches to improve energy efficiency of telecommunications network. The main attention is focused on technological and architectural approaches to reduce power consumption. Shown the correlation approaches to improve energy efficiency.

In technological approaches presented the main technical parameters that determine the energy efficiency of optical switches and converts, where the main approach of such devices is to removal expensive and energy intensive optoelectronic conversion. Presented all-optical switches, their energy and time switching. There are also advantages of all-optical converters based on nonlinear effects in terms of energy efficiency. Main attention is drawn on the directions of development of all-optical devices and found that the most relevant today is a device based on optical effects. The work presents prospects are searching electro-, acousto-, thermo- and nonlinear optical coefficient for these devices.

Reviewed the prospects of effective using of available wavelengths because each of these waves consume about 1.2 kW of electricity.

Shows the prospects of use asynchronous transport technologies such as Optical Transport Network (OTN) and Gigabit Ethernet and benefits in term of energy efficiency, because transport technologies Synchronous Digital Hierarchy (SDH) inefficiently uses bandwidth of optical channel that influence on energy efficiency telecommunication network. Presented the advantages of using crosscutting-channel with removal of intermediate optoelectronic conversion.

Established that the lower limit power consumption of telecommunication networks determine access network, where for today the most energy efficient technology is passive

optical network (PON). No less important factor in the energy consumption of telecommunications networks determines the hardware manufacture. Found that one of the less energy efficiency devices is core router and shows the main part that define its energy consumption.

In architectural approaches to improve network energy efficiency presented the transfer of information processing from the router to the lower level.

Done calculation of energy consumption of telecommunications equipment for typical network with intermediate optoelectronic conversion and without it. In calculated example shows that energy efficiency transport optical network increased by 63 % when removed intermediate optoelectronic conversion and opening crosscutting channel.

Key words: optical network, power consumption, DWDM, optical switch.

Вступ

Сьогодні телекомунікаційне обладнання споживає приблизно 5 % електроенергії із загальної виробленої потужності [1]. Попит на телекомунікаційні послуги зростає і надалі, що призводить власне до зростання цього показника. Популярність Інтернету ще не досягла апогею, і характеризується експоненціальним зростанням трафіку, який передається по мережі. Це зростання зумовлене збільшенням кількості абонентів, які хочуть отримати певні телекомунікаційні послуги, причому із високою швидкістю передавання, вимоги до якої зростають із кожним роком, а також популярністю інтернет-послуг, оскільки кожен користувач хоче задовольнити свої потреби щодо завантаження контенту. Своєю чергою, зростання трафіку призводить до перезавантаження телекомунікаційних мереж і встановлення додаткового обладнання. Всі вищеописані обставини призводять до зростання необхідної кількості електроенергії для роботи телекомунікаційних мереж. Тому завдання зменшення енергоспоживання сьогодні актуальне і потрібен комплексний підхід до його вирішення. Такий підхід повинен передбачати не тільки принципи зменшення енергоспоживання, а й розроблення методів для їх досягнення.

Центр енергоефективності телекомунікацій в Мельбурні виділяє чотири підходи щодо вдосконалення мережевої енергоефективності [2]: технологічні, архітектурні, протокольні, the cloud. Метою цієї роботи є аналіз перших двох підходів і наведення для них основних принципів щодо зменшення енергоспоживання. Всі ці підходи безпосередньо залежать один від одного, які в комплексі впливають на енергоефективність телекомунікаційних мереж. Рис. 1 детальніше представляє зв'язки цих підходів.

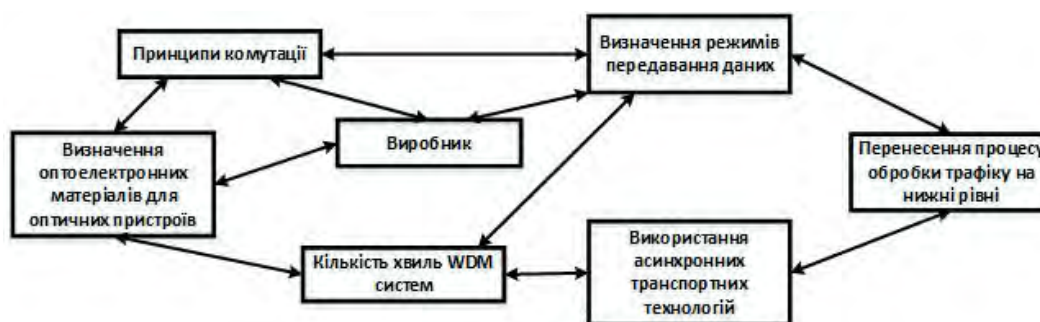


Рис. 1. Структурна схема залежності підходів підвищення енергоефективності транспортної мережі

Аналіз технологічних принципів підвищення енергоефективності оптичних транспортних мереж

Принцип комутації

Сьогодні телекомунікаційні оператори мають два варіанти оптичних комутаторів для управління їхньою пропускною здатністю, а саме комутатор типу О-Е-О (з оптоелектронним

перетворенням) і повністю оптичні, фотонні комутатори О-О-О. З енергетичного погляду О-О-О комутатори порівняно із О-Е-О витрачають до 96 % менше електроенергії, а також більш масштабовані й забезпечують економію до 92 % за площею [3]. Крім того, використання О-О-О забезпечить економію витрат на декількох рівнях, а саме економію на енергетичному і розподільному обладнанні, такому як батареї, випрямлячі й дизель-генератори. Кожен з цих блоків повинен бути збережений, однак потребує щомісячних процедур тестування, тому є можливість заощадити на обслуговуванні. Нарешті, оператор повинен підтримувати кондиціонери, які забезпечують оптимальний робочий режим приміщень. Зазначимо, що якщо телекомунікаційний пристрій витрачає 1 Вт електроенергії, необхідно витратити 1 Вт енергії для його охолодження [4]. Економія на цих операційних затратах є чималою для телекомунікаційного оператора.

Сучасний ринок пропонує широкий вибір повністю оптичних комутаторів (див. *табл. 1*), проте деякі технічні реалізації цих пристроїв поки що залишаються на стадії наукових досліджень. Дані в *табл. 1* зібрано з технічних характеристик реальних пристроїв, а також сучасних наукових досліджень в напрямку фотонних комутаторів.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика видів повністю оптичних комутацій

Тип комутації	Час комутації	Втрати, дБ	Споживання, мВт	Виробник
Механікооптична	<20 мс	<1.15	420	LightBend
	<4 мс	<0.6	230	JDSU
	<10 мс	<1.3	420	LightBend
MEMS	<10 мс	<1.8	325	JDSU
	<30 мс	<2.4	500	DiCon
	<10 мс	<1.3	170	Agiltron
	<20 мс	<1.1	40	Sercalo
електрооптична	<10 нс	<4	9,4	EOspace
магнетооптична	<200 мкс	<1.2	30	Gigalight
рідкокристалічна	<100 нс	<3	-	fraunhofer
термооптична	<22 мс	<7.5	11	[5]
акустооптична	<10 мкс	<1	-	[6]

Для правильної та ефективної оцінки енергоефективності оптичних комутаторів слід виділити в них такі технічні елементи та параметри: вхідна потужність оптичного сигналу, використання О-Е-О, використання хвильових конверторів, внесені втрати, рівень вихідного сигналу.

Розглянемо кожен із елементів детальніше. Для проведення процесу комутації необхідний достатній рівень оптичного сигналу, оскільки пристрій вносить також власні загасання (внесені втрати). Так, наприклад, під час електрооптичної комутації внесені втрати можуть сягати 5 дБ [7]. Тому для можливості детектування оптичного сигналу потрібно використати попередній підсилювач, який забезпечить необхідний рівень оптичного сигналу. Удосконалення методів оптичної комутації дасть змогу зменшити втрати, які вносять ці пристрої, що, своєю чергою, усуне необхідність використання попередніх підсилювачів а також вихідних підсилювачів (рівень вихідного сигналу), що додатково споживають електроенергію.

Наукові розробки повністю оптичних комутаторів спрямовані на розроблення нових та вдосконалення наявних пристроїв, які ґрунтуються на різних оптичних ефектах, оскільки вони забезпечують швидкий час комутації за низьких енергетичних затрат. До таких оптичних ефектів, що використовуються у цих пристроях, належать акусто-, електро- та термооптичні ефекти. Центральним елементом у таких пристроях є оптоелектронний матеріал, який характеризується певними акусто (M_2)-, електро (r_{jk})- та термооптичними (dn/dT) коефіцієнтами. Що вищий такий коефіцієнт, то менше потрібно використовувати енергії для досягнення того чи іншого ефекту, наприклад, для акустооптичного ефекту, який подається так:

$$h = \sin^2 \left[\frac{P}{I} \left(\frac{M_2 \cdot P_{ac} \cdot L}{2 \cdot H} \right)^{1/2} \right], \quad (1)$$

де P_2 – акустична потужність; M_2 – параметр акустооптичної якості; L і H – геометричні розміри зразка; λ – довжина хвилі.

Параметр M_2 характеризує матеріал, що використовується як акустооптична комірка. В [8–9] проводяться дослідження щодо вибору орієнтації зразка з максимальним значення M_2 , для зменшення P_a , що дозволяє зменшити енергозатрати та збільшити час ефективного використання комірки.

Аналогічно і в інших пристроях, як і в електрооптичних, також є визначальною зміна показника заломлення, яку без індексних позначень для ефекту Поккельса можна подати у вигляді

$$\Delta n_i = \frac{E_k \cdot r_{ik}}{2} \cdot n_j^3 \quad (2)$$

І в [8, 10] проводились дослідження для ефективного використання електрооптичної комірки в зазначених пристроях.

Комутатори, основані на властивостях оптичних ефектів, мають переваги над іншими технологіями реалізації повністю оптичних комутаторів типу О-О-О. Такі пристрої працюють в третьому вікні прозорості, яке сьогодні найбільше використовується, крім того, забезпечують найвищий час комутації, який досягає 10 нс [7]. Тому можна зробити висновок, що для комутаторів, в яких ключовим елементом є оптоелектронний матеріал, можна вважати одними із найперспективніших технологій для реалізації повністю оптичних комутаторів.

Дослідження підвищення енергоефективності можна також провести для оптичних модуляторів, для багатьох з яких ключовим елементом також є оптоелектронний матеріал [11–12].

Використання оптоелектронного перетворення є визначальним параметром енергоспоживання оптичного комутатора, яке використовуються для вставляння клієнтських сигналів, проведення хвильової конвертації, а також проведення власне процесу комутації. Зауважимо, що вставляння клієнтських сигналів на проміжних вузлах, а також використання хвильових конвекторів з оптоелектронним перетворенням визначають до 85 % спожитої оптичним комутатором електроенергії (див. рис. 2) [13]. Видалення оптоелектронного обладнання суттєво зменшить енергоспоживання оптичних комутаторів. Вже є заміна дорогому і енергозатратному оптоелектронному перетворенню. Наприклад, вставляння клієнтських сигналів без використання проміжного оптоелектронного перетворення може здійснюватися за допомогою статичних чи реконфігурованих оптичних мультиплексорів вводу/виводу [14], а Е/О хвильові конвертори можуть бути замінені на оптичні, які розроблені на основі нелінійних ефектів [15]. Наведемо основні параметри, які визначають енергоспоживання оптичних конверторів: вхідна потужність оптичного сигналу, вхідна потужність допоміжних оптичних сигналів, використання напівпровідникових оптичних підсилювачів, вибір нелінійних матеріалів, вихідна потужність оптичного сигналу.

Вхідна потужність оптичного сигналу є одним із визначальних параметрів роботи оптичних хвильових конверторів, оскільки конвертори, розроблені на основі нелінійних ефектів, дають змогу отримати вихідні сигнали близько 0,1 % від амплітуди основного вхідного сигналу [15]. Це потребує використання попередніх і кінцевих підсилювачів, що підвищують енергоспоживання такого пристрою, проте їх невикористання призведе до низького рівня вихідного сигналу, що виявиться у неможливості детектування оптичного сигналу після проходження через цей пристрій. Виходом із цієї ситуації є використання матеріалів, у яких ефект нелінійності проявляється найсильніше, тобто краший коефіцієнт нелінійності (d_{ik}). Набір таких матеріалів наведено в роботі [16].

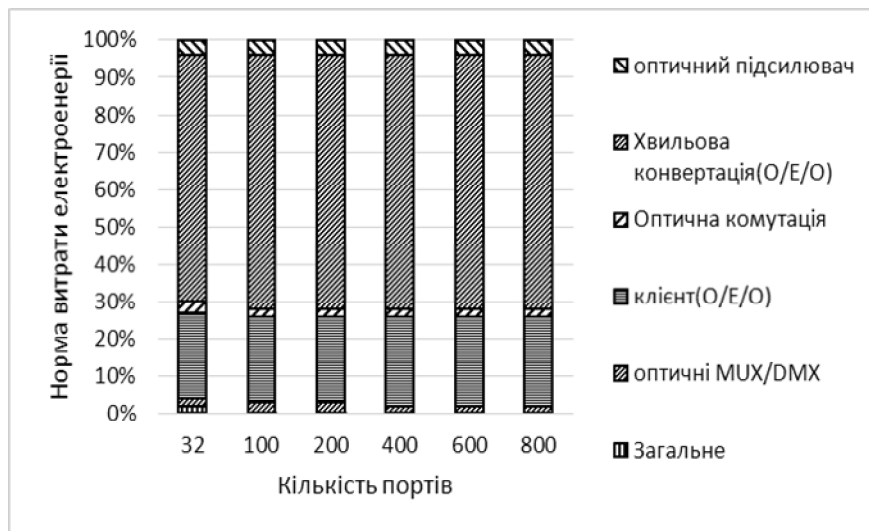


Рис. 2. Споживання електроенергії компонентів фотонного комутатора з хвильовими конверторами, які займають 50 % наявних портів [11]

Робочим елементом у таких пристроях є напівпровідниковий оптичний підсилювач (Semiconductor optical amplifier – SOA). Конвертор, оснований на крос-фазовій модуляції, використовує два SOA підсилювачі, проте потребує меншої потужності вхідного сигналу, а конвертор на основі крос-модуляції інтенсивності передбачає використання лише одного такого підсилювача [17]. Забезпечення оптимального значення вхідної потужності оптичного сигналу і кількості підсилювачів SOA підвищить енергоефективність таких пристроїв. Однак видалення оптоелектронного перетворення є ключовим підходом щодо підвищення енергетичної ефективності фотонних комутаторів і хвильових конверторів.

Кількість хвиль WDM систем

Як відомо, сумарна потужність, яку можна ввести в оптичне волокно, становить не більше ніж 100 мВт (20 дБ) [18]. Очевидно, що збільшення кількості хвиль WDM систем передбачає зменшення потужності кожної із доступних довжин хвиль для неперевиконання сумарної потужності, оскільки у разі переходу цієї межі спостерігається ціла низка оптичних нелінійних ефектів [19]. Це ж призводить до зменшення довжини регенераційної ділянки і відповідно частішого використання регенераторів на ділянці оптичного тракту. Так, для 80-канальної системи рівень потужності на канал становить 1 дБ, для 40-канальної 4 дБ, а для 32-канальної 5 дБ. Зазначимо, що використання додаткової кількості хвиль спричиняє додаткові капітальні (обладнання) й експлуатаційні (електроенергія) витрати. Витрата електроенергії на одну довжину хвилі – близько 1,2 кВт [4]. Із вищесказаного можна зробити висновок, що один із методів для підвищення енергетичної ефективності DWDM мереж – завантажувати кожну доступну хвилю, наскільки це можливо.

Використання асинхронних транспортних технологій

Завдяки використанню оптичних волокон як на рівні транспортних мереж, так і на рівні агрегації та доступу, вдалося вирішити проблему власне забезпечення необхідної смуги пропускання. Однак безпосереднє перетворення IP пакета на оптичний сигнал спричиняє цілу низку капітальних та операційних витрат, які впливають із неефективного використання доступного оптичного середовища. Для вирішення цієї проблеми сьогодні використовуються транспортні технології на проміжному рівні між оптичним і IP рівнем. Транспортна технологія SDH, яку ще активно застосовують вітчизняні й закордонні оператори зв'язку, неефективно використовує пропускну здатність каналів і погано адаптується під вибуховий IP трафік [20]. На противагу SDH, активно впроваджуються технології OTN та Gigabit Ethernet. Використання цих технологій дає змогу ефективніше використовувати доступну пропускну здатність оптичного

середовища, оскільки час відправлення транспортного модуля чи фрейму не є строго визначеним і доступну смугу може використовувати інший абонент. Однією із головних переваг технології OTN є використання механізмів корекції помилок FEC, що дозволяє отримати додатково 6 дБ до оптичного бюджету лінії [21], а це є важливим параметром для збільшення довжини регенераційної ділянки (див. п. *Кількість хвиль WDM систем*). Використання асинхронних транспортних технологій разом із розробленням методів перегрупування потоків дасть змогу зменшити необхідну кількість робочих хвиль, що приведе до підвищення енергоефективності транспортних мереж, оскільки, як наголошувалось вище, витрата електроенергії на одну довжину хвилі – близько 1,2 кВт.

Визначення режимів передавання даних

Сьогодні є два основні режими передачі даних. Це режим із оптоелектронним перетворенням і прозорий режим, коли відбувається передача даних без трактування їх змісту. Перший режим характеризується інтелектуальністю, простотою керування мережею, сумісністю обладнання від різних виробників, а також здатністю до хвильової конвертації [22]. Проте це потребує використання дорогого й енергозатратного оптоелектронного перетворення на кожному із проміжних вузлів. Інший режим – прозорий, передбачає власне усунення цього проміжного оптоелектронного перетворення, а також зменшить обсяг інформації, який передаватиметься на верхній рівень, тобто зменшиться використання пристроїв, що сприятиме економії електроенергії на пристроях вищих рівнів. На вищі рівні відбуватиметься передача виключно службових даних або блока даних, якщо цей вузол кінцевий. Зазначимо, що прозорий режим передбачає відкриття наскрізного каналу між двома кінцевими вузлами, тому відбувається резервування цілої довжини хвилі незалежно, від того, який об'єм трафіку передається. Такий підхід потребує розроблення методів, які дозволяють максимально завантажувати кожен доступну довжину хвилі (див. п. *Кількість хвиль WDM систем*). Звідси можна зробити висновок, що використання прозорого режиму передавання даних підвищує енергоефективність транспортних оптичних мереж, оскільки не потрібне дороге й енергозатратне оптоелектронне перетворення, а також розвантаження пристроїв верхніх рівнів ієрархії.

Аналіз енергоефективних технологій мереж доступу

Сьогодні є ціла низка технологій для мереж доступу, кожна із яких забезпечує необхідну швидкість передачі, причому споживаючи різну кількість електроенергії. Як видно із рис. 3, а, безпровідні технології споживають порівняно з провідними більшу кількість електроенергії [23]. Технологія PON (Passive Optical Network) забезпечує найвищу енергоефективність стосовно інших технологій мереж доступу. Мета цієї технології – забезпечити широкосмугову передачу інформації у економічний спосіб, а основна ідея PON – це використання лише одного модуля в OLT (optical line terminal) для передавання інформації від безлічі абонентських пристроїв [24].

Правильний вибір технології мереж доступу надає оператору можливість зменшити операційні витрати на електроенергію, оскільки енергоспоживання мереж доступу визначає нижню межу загальної енергоспоживання телекомунікаційних мереж (див. рис. 3, б).

Виробник обладнання

Сучасний телекомунікаційний ринок представлений Lucent, Nortel, Alcatel, Cisco, Ericsson та іншими компаніями, які забезпечують широкий вибір телекомунікаційного обладнання. Кожен із таких пристроїв характеризується цілою низкою технічних параметрів, починаючи від версії процесора, кількості портів, режимів роботи і завершуючи параметром енергоефективності. Найбільш енергоефективним сучасним обладнанням є обладнання компанії Juniper [4]. Крім того, ядровий маршрутизатор Juniper T1600 встановив рекорд енергоефективності в IP/MPLS маршрутизації в 2008 р.. Проте вони не забезпечують такої високої продуктивності, як CISCO CRS-1.

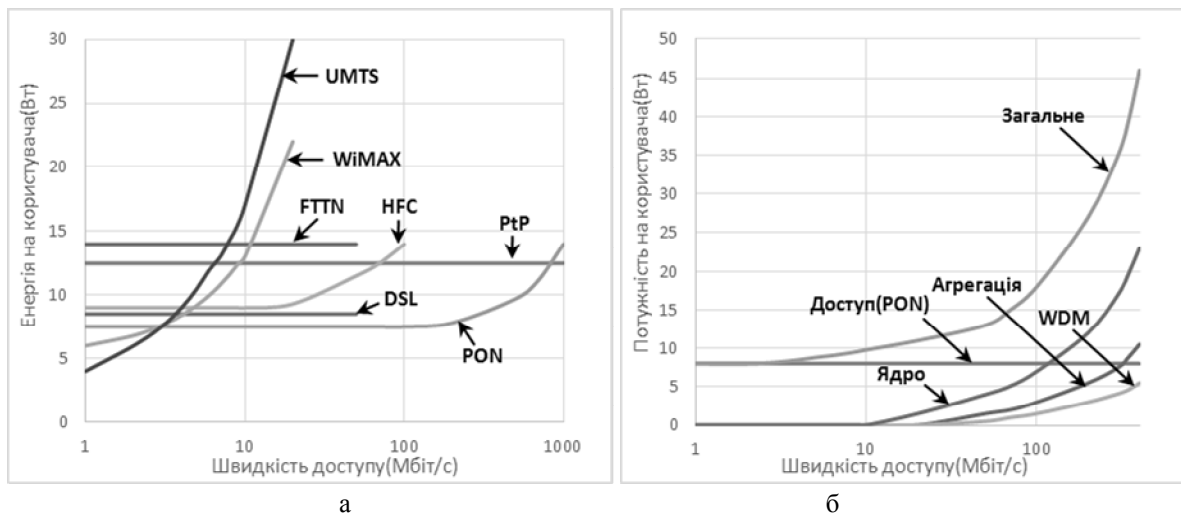


Рис. 3. Споживання електроенергії:
 а – технологіями мереж доступу; б – загальною телекомунікаційною мережею [23]

Аналіз архітектурних рішень підвищення енергоефективності

Ядровий IP маршрутизатор є одним із елементів транспортних мереж, що найбільше споживають, порівняно із іншими пристроями [2] (рис. 4, а). Відомо, що енергетичне споживання IP маршрутизатора визначають такі елементи: живлення і охолодження (PS&C), робота пристрою (FE), комутаційна фабрика (SF), площина управління (CP), вхідні/вихідні карти (I/O), буфери (B). На рис.4, б представлено відсоткове співвідношення цих елементів.

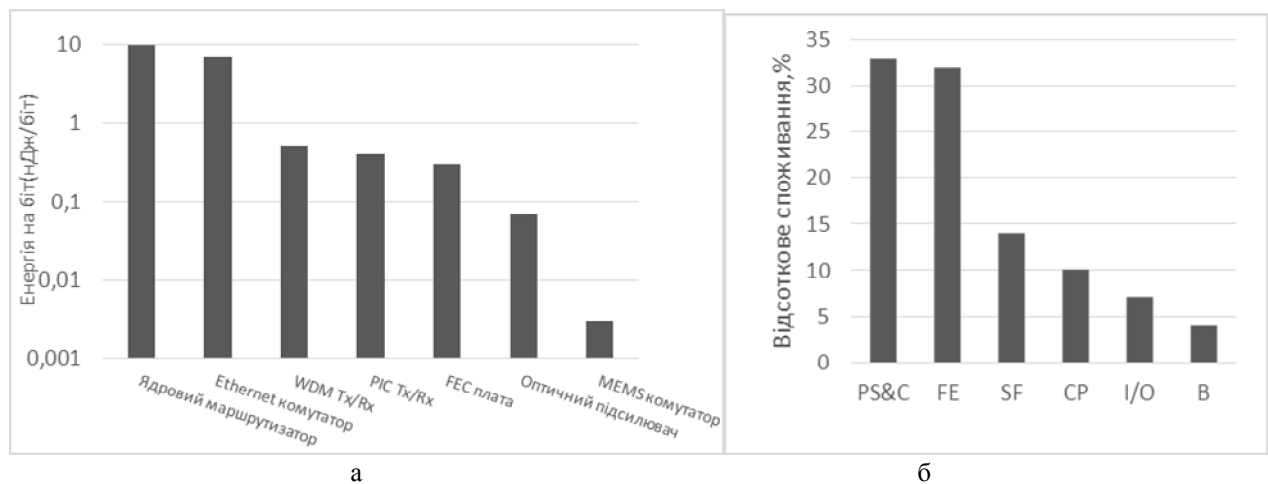


Рис. 4. Енергоспоживання: а – пристроїв транспортної мережі [2]
 б – елементів ядрового маршрутизатора [23]

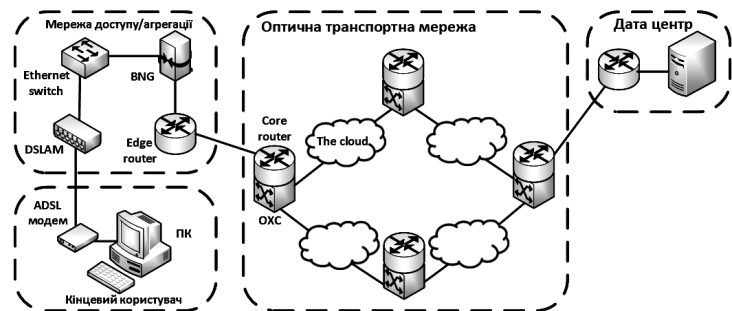
Так, IP маршрутизатор для обробки одного біта інформації споживає приблизно 10 нДж електроенергії [2]. Відповідно другий рівень, на якому працюють такі технології, як SDH, OTN, Gigabit Ethernet, для обробки одного біта інформації споживає близько 1 нДж. А для трафіку, який комутуватиметься виключно на WDM рівні (1 рівень), для обробки 1 біта потрібно лише 0,1 нДж. Тому в разі усунення обробки службової інформації на ядрових маршрутизаторах проміжних вузлів вдасться суттєво підвищити енергоефективність транспортної мережі. Ці маршрутизатори будуть використовуватись лише на кінцевих вузлах передавання даних. Перший рівень, де працює технологія WDM, є найенергоефективнішим з погляду обробки службової інформації, проте реалізація комутації лише на WDM рівні є складною технічною задачею. Тому оптимальним рішенням є впровадження процесу обробки на другому рівні, який узгоджено працюватиме із першим і третім рівнем. Проте такі рішення потребують розроблення методів, які дадуть змогу

усувати від процесу обробки проміжні ядрові маршрутизатори. Також не слід забувати, що відкриття наскрізних каналів (див. п. *Визначення режимів передавання даних*) передбачає процес комутації виключно на WDM рівні із резервуванням необхідних часових і спектральних ресурсів, що також підвищує енергоефективність мережі.

Розрахунок затрат електроенергії для оптичної транспортної мережі

В роботі здійснено розрахунок затрат електроенергії для мережі доступу/агрегації та транспортної мережі під час передавання одного IP пакета, із довжиною 1000 байт. Розрахунок за мережевою структурою (рис. 5). Для визначення енергозатрат досліджено технічні характеристики, а саме споживану потужність обладнання компаній Cisco, Huawei, EOspace. Кінцевий користувач має доступ до мережі за допомогою модемної технології ADSL (Asymmetric Digital Subscriber Line) зі швидкістю 10 Мбіт/с. Швидкість передавання всередині ядра мережі становить 10 Гбіт/с. У табл. 2 наведено енергетичне споживання телекомунікаційного обладнання.

Рис. 5. Досліджувана структура телекомунікаційної мережі



Таблиця 2

Енергоспоживання телекомунікаційних пристроїв

Обладнання	Енергоспоживання, $Wm/год$	Марка моделі, виробник
DSLAM	187,38	Huawei MA 5016 DSLAM
Ethernet switch	170	Cisco ME 2600x Ethernet Switch
BNG	425	Cisco ASR 9001-S Router
Edge router	150	Cisco 7210 Router
O/O/O комутатор	0,0094	EOspace Electro-optic switch
Обладнання	Енергоспоживання, $nWm/біт$	Посилання
Core router	2,7	[23]
Транспортна технологія	0,27	[23]
O/E перетворення	0,336	[25]
E/O перетворення	0,722	[26]
Комутаційна фабрика (O/E/O)	0,405	[23]

Як наголошено вище, розрахунок затрат електроенергії здійснюється на прикладі передавання одного IP пакета від кінцевого користувача до датацентру, включаючи лише частини телекомунікаційної мережі (мережі доступу/агрегації та транспортної мережі). Для кожного обладнання було знайдено затрату електроенергії на обробку одного біта інформації на основі параметрів енергоспоживання обладнання і максимальної кількості пакетів або потоку, яку він може обробити за одиницю часу.

Після цього визначаємо затрату електроенергії для передачі пристроєм одного IP пакета, середня довжина якого становить 1000 байт. Розрахунки проведені для двох режимів роботи: з оптоелектронним перетворенням на проміжних вузлах і без них, тобто відкриттям наскрізного каналу між двома кінцевими вузлами транспортної мережі. В останньому випадку на верхні рівні, тобто рівні, на яких працює транспортна технологія і ядрові маршрутизатори, передається лише службова інформація IP пакета (заголовок пакета – 20 байт), а не весь пакет, як у режимі із оптоелектронним перетворенням. Також приймаємо, що пакет проходить три проміжні вузли в ядрі мережі. В результаті отримуємо сумарну затрату електроенергії для передачі одного пакета, детальний склад якого подано в табл. 3

Результати обчислень

Частина мережі	Режим із О/Е/О	Режим без О/Е/О
Мережа доступу	37,715	37,715
О/Е/О	5,603	1,088
О/О/О	0	0,783
Транспортний рівень	2,216	0,555
Ядрові маршрутизатори	13,85	5,543
Сумарна затрата електроенергії	59,384	45,684

Як бачимо, після видалення проміжного оптоелектронного перетворення затрати електроенергії зменшилися на 25 відсотків загалом, а для транспортної оптичної мережі на 63 %. Як видно із рис. 6, мережа доступу визначає нижню межу енергетичних затрат оператора, що підтверджує правильність наших розрахунків [23].

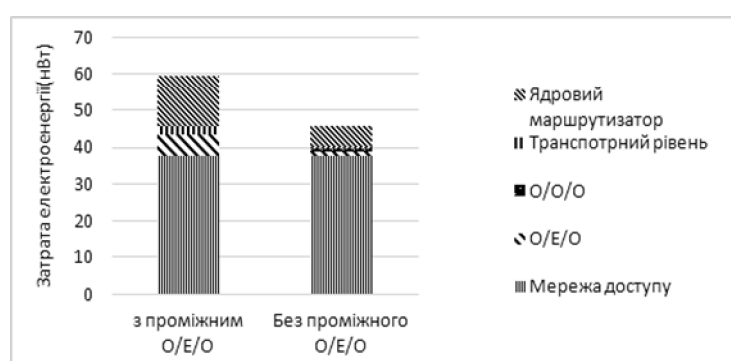


Рис. 6. Затрати електроенергії у двох режимах роботи транспортної оптичної мережі

Висновки

У роботі представлено технічні та архітектурні підходи щодо підвищення енергоефективності телекомунікаційних мереж. В технічних засобах запропоновано обійтись без дорогого і енергозатратного оптоелектронного перетворення в оптичних комутаторах і конверторах, а також подано альтернативи вирішення проблеми. Наведено основні технічні параметри, які визначають їхнє енергоспоживання.

Для ефективного завантаження доступних довжин хвиль частотних діапазонів, враховуючи, що кожний споживає близько 1,2 кВт електроенергії, запропоновано здійснювати перегруповання потоків. Наведено переваги використання асинхронних транспортних технологій, які ефективніше використовують пропускну здатність оптичних каналів, що дозволяє звільнити частину довжин хвиль і підвищить енергетичну ефективність телекомунікаційної мережі.

Розглянуто режими передавання даних і встановлено, що прозорий режим передавання суттєво зменшує енергоспоживання такої мережі. Зосереджено увагу на мережах доступу, з яких сьогодні найенергоефективнішою є технологія пасивних оптичних мереж (PON). Не менш важливим чинником, який впливає на енергоефективність телекомунікаційних мереж, є виробник обладнання, за цим критерієм переважає компанія Juniper.

Встановлено, що ядрові маршрутизатори споживають чи не найбільше електроенергії порівняно з іншим обладнанням телекомунікаційних мереж. Наведено рішення щодо перенесення процесу обробки службових даних з ядрових маршрутизаторів на нижні рівні, де працює менш енергозатратне обладнання.

Розрахунок показав, що енергоефективність транспортної мережі зросла на 63 % після видалення проміжного оптоелектронного перетворення з відкриттям наскрізного каналу.

Показано, що необхідний комплексний підхід до визначення енергетичного балансу оптичної транспортної мережі, щодо його здійснення, оскільки описані підходи безпосередньо залежать один від одного, що в комплексі впливає на енергоефективність телекомунікаційних мереж.

1. GeSI, *The Climate Group Smart 2020: Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age*, 2008. 2. Tucker R., Hinton K., Ayre R. *Energy efficiency in cloud computing and optical networking. – ECOC 2012 Tutorial.IEEE Network. – March/April. – 2011. – p. 6.* 3. Luu J. *Optical Switching. Інтернет: <http://services.eng.uts.edu.au/~kumbes/ra/Emerging/OpticalSwitchingReport/justin/optical.htm#>.* 4. Idzikowski F. *Power consumption of network elements in IP over WDM network. TKN technical Reports Series. – Berlin. – 2009.* 5. Watanabe K., Kasahara R. and Hashizume Y. *Extremely-low-power-consumption thermo-optic switch with silicon-silica hybrid structure. NTT Technical Review. – Vol. 8. – No.2. – 2010. – P. 1.* 6. Маккавеев В. *Фотонные коммутаторы. – Компоненты и технологии. – 2006. – № 2.* 7. EOspace. *Exceptionally-low-loss LiNbO₃ optical devices & ICs. Інтернет: <http://www.eospace.com/pdf/EOSPACЕ-custom-optical-switch.pdf>* 8. Лаба Г. П., Юркевич О. В., Карбовник І. Д., Кайдан М. В., Думич С. С., Сольський І. М., Андрущак А. С. *Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акустооптичного ефектів в кристалічних матеріалах твердотільної електроніки. Апробація на прикладі кристалів LiNbO₃ та LiNbO₃:MgO. Частина II. Заповнення матриць пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів кристалів LiNbO₃ та LiNbO₃:MgO // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка" "Електроніка". – 2008 – № 619. – С. 172–180.* 9. Andrushchak A. S., Chernyhivsky E. M., Gotra Z. Yu., Kaidan M. V., Kityk A. V., Andrushchak N. A., Maksymyuk T. A., Mytsyk B. G., Schranz W. *Spatial anisotropy of the acoustooptical efficiency in Lithium Niobate Crystals // J. Applied Physics. – 2010. – V.108. – P.103118(1-5).* 10. Andrushchak A. S., Mytsyk B. G., Demyanyshyn N. M., Kaidan M. V., Yurkevych O. V., Dumych S. S., Kityk A. V., Schranz W. *Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials : II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization // Optics & Lasers in Engineering. – 2009. – Vol. 47, N.1. – P. 24–30.* 11. McCarron D. J. *A Guide to acousto-optic modulators. Інтернет: <http://massey.dur.ac.uk/resources/slcornish/AOMGuide.pdf>.* 12. Enscoe R. F., Kocka R. J. *Electro-optic modulation: system and applications. Інтернет: http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Laser_und_Zubehoer/Laserkomponenten/Documents/Accessories.pdf.* 13. Murakami M. *Analyzing power consumption in optical cross-connect equipment for future large-capacity optical network. – Journal of network. – Vol.5. – No.11. – P. 1254.* 14. Perrin S. *The need for next-generation ROADM network. Інтернет: http://www.calient.net/wp-content/uploads/downloads/2010/11/NG_ROADM_WP.pdf* 15. Сленов Н. *Волновые конверторы и модуляторы // Электроника: наука, технология, бизнес. – 6/2000. – С. 6.* 16. Boyd R. W., Fischer G. L. *Nonlinear optical materials. – Encyclopedia of Materials: Science and Technology. – 2001. – P. 6237.* 17. Ramamurthy B., Mukherjee B. *Wavelength conversion in WDM networking // IEEE journal on selected areas in communications, Vol.16. – No.7. – 1998. – P. 1061.* 18. Кись О. М., Корнійчук В. І. *Проектування волоконно-оптичної транспортної мережі: навч. посібник. – Одеса, 2014.* 19. Singh S. P. and Singh N. *Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications // Progress in electromagnetics research, PIER. – Vol.73. – 2007. – 249 p.* 20. Пріоком. *Технологія синхронної цифрової ієрархії (SDH). Інтернет: <http://priocom.com/ua/products/arterial-networks/mppls>.* 21. ITU. *Optical transport network (OTN) tutorial. Інтернет: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf>.* 22. Tellium. *Optical switches: making optical networks a brilliant reality. Інтернет: http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/wdm/OXC_2.pdf.* 23. Hilton K., Baliga J., Feng M., Ayre R. and Tucker R. S. *Power consumption and energy efficiency in the internet.* 24. Effenberger F., Cleary D., Haran O., Kramer G., Li R. D., Oron M., Prelffer T. *An introduction to PON Technologies // IEEE communication magazine. – March. – 2007. – P. 17.* 25. Chu T., Fujioka N. and Ishizaka M. *Compact, lower-power-consumption wavelength tunable laser fabricated with silicon photonic-wire waveguide micro-ring resonator // Optical express. – 2009. – Vol. 17. No.16. p. 14063.* 26. Muramoto Y., Yoshimatsu T., Nada M. and Ishibash T. *High-speed photodetector technologies // NTT technical review. – Vol.10. – No.12 Dec. – 2012. – P. 1.*