

**МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ
В ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Сонг Венгуанг^{1*}, Андрущак В.С.^{2**}, Кайдан М.В.^{2***}, Бешлей М.І.^{2****}, Кочан О.В.^{1,2*****},
Су Цзюнь^{3*****}

¹ School of Computer Science, Yangtze University,
Jingzhou, 434023, China, e-mail: wenguang_song@yangtzeu.edu.cn

² Національний університет “Львівська політехніка”,
вул. Степана Бандери 12, Львів, 79013, Україна,
e-mail: mykola.i.beshlei@lpnu.ua; orestvk@gmail.com

³ School of Computer Science, Hubei University of Technology,
Wuhan, China.

Запропоновано методику визначення комплексного параметру енергоспоживання для інфокомунікаційних мереж. На відміну від відомих, запропонована методика враховує гетерогенність та багатошаровість мережі. А також враховує параметр потужності, що витрачається під час простоювання мережевого обладнання в процесі обробки службових блоків даних, що є досить важливим завданням задля підвищення точності визначення енергоспоживання на етапі впровадження енергоефективної мережі. Згідно цієї методики розрахунок параметра енергоспоживання можна проводити для будь якої архітектури інфокомунікаційної мережі, конфігурації мережевих пристроїв та для обладнання від різних виробників. Бібл. 24, рис. 4.

Ключові слова: енергоспоживання, інформаційно-комунікаційна мережа, DWDM, електрооптика, акустооптика, комутатор, модулятор.

Вступ і постановка проблеми. На сьогоднішній день телекомунікаційне обладнання споживає приблизно 5% електроенергії із загальної виробленої електричної потужності [1]. В свою чергу, попит на інформаційні послуги зростає і надалі, що призводить до зростання цього показника. Одним із ключових параметрів в галузі енергетики телекомунікацій є параметр енергоспоживання, під яким розуміється кількість електроенергії, що витрачається при передачі одного біта інформації між двома вузлами [2-5]. Визначення цього параметру є важливою задачею не тільки для зменшення необхідної кількості енергії телекомунікаційних мереж, а й для мережі в цілому. Є низка причин, що зумовлює зменшення енергоспоживання телекомунікаційних мереж [6]. У зв'язку із зростанням кількості абонентів та попиту на телекомунікаційні послуги, зростають вимоги до пропускної здатності мереж [7-9]. Однак власне енергетичне споживання мереж є важливішою проблемою у порівнянні з необхідною пропускною здатністю, оскільки саме енергоспоживання обмежує її зростання [10-11]. В додаток високошвидкісні транспортні оптичні мережі потребують надійних пристроїв обробки даних як на крайових, так і на граничних вузлах. При збільшенні швидкості передавання даних суттєво зростає енергоспоживання вузлів мережі через вище навантаження їхніх процесорів. Ці проблеми можуть стати одними з основних експлуатаційних перешкод і, в гіршому випадку, перешкодити наданню нових послуг і додатків [12]. Для забезпечення необхідної якості обслуговування ставляться вищі вимоги до комутаційних елементів мережі, тим самим зумовлюючи збільшення керуючих напруг цих пристроїв, що призводить до підвищення енергоспоживання мереж [13]. Крім того, підвищення напруг призводить до зменшення терміну надійної експлуатації пристроїв. Саме це змушує пошук і розробку нових методів, критеріїв, елементів і пристроїв мереж задля забезпечення необхідних їй робочих параметрів, при чому із невеликими капітальними та операційними витратами для оператора та високим сервісом обслуговування (QoS) для абонентів. Таким чином, актуальним завданням є

© Су Цзюнь, Андрущак В.С., Кайдан М.В., Бешлей М.І., Кочан О.В., Сонг Венгуанг, 2020
ORCID ID: *<https://orcid.org/0000-0003-1002-6709>; **<https://orcid.org/0000-0002-2185-0923>;
<https://orcid.org/0000-0002-9942-0229>; *<https://orcid.org/0000-0002-7122-2319>;
*****<https://orcid.org/0000-0002-3164-3821>; *****<https://orcid.org/0000-0002-4290-5049>

розроблення універсальної методики визначення параметру енергоспоживання, яка дасть змогу отримати даний параметр для будь якої архітектури інфокомунікаційної мережі, конфігурації мережевих пристроїв і для обладнання від різних виробників.

На сьогоднішній день існують методики, які дають змогу визначити і оцінити параметр енергоспоживання. Наприклад, центр енергоспоживання телекомунікацій в Мельбурнському університеті виділяє чотири підходи щодо вдосконалення мережевого енергоспоживання [14]: архітектурні, технологічні, протокольні, клаудні. Також в цій роботі у підрозділі «Дослідження вузьких місць транспортних оптичних мереж» надано приблизні витрати електроенергії для пристроїв як електричного, так і оптичного домену у разі обробці одного біта інформації. Проте у даній моделі не показано, яким чином повинне визначатися енергоспоживання мережі в цілому, а наведені значення енергоспоживання є наближеними і не враховують обладнання від різних виробників. Таким чином, запропонована Мельбурнським університетом модель передбачає низку підходів щодо зменшення енергоспоживання транспортних оптичних мереж з використанням приблизно знайдених значень енергоспоживання пристроїв цієї мережі.

Іншу модель, що будується на багаторівневій структурі транспортних оптичних мереж, розроблено Міланською політехнікою [15]. В ній враховано методики визначення енергоспоживання граничних і проміжних вузлів. Також ця модель враховує різні типи передачі обладнання від різних виробників і швидкість передачі даних. Проте, в ній не враховано потужність, яка витрачається під час простоювання обладнання, у процесі обробки службових блоків даних, що є досить важливо задля підвищення точності визначення енергоспоживання. Звідси випливає, що важливим науково-практичним завданням є розробка максимально точної універсальної методики розрахунку енергоспоживання у інформаційно-комунікаційних мережах з метою оптимального вибору необхідного мережевого обладнання задля побудови енергоефективних телекомунікаційних систем. Тому, **метою** роботи є розроблення універсальної методики розрахунку енергоспоживання в інфокомунікаційних системах, що враховує їхню гетерогенність та багатошаровість, а також потужність, що витрачається в умовах простоювання мережевого обладнання у процесі обробки службових блоків даних.

Методика розрахунку енергоспоживання в інфокомунікаційних мережах. На основі проведеного аналізу робіт [16-18] щодо розрахунку комплексного параметру енергоспоживання авторами визначено основні критерії, які впливають на енергетичне споживання інформаційно-комунікаційних систем, а саме: кількість та структура задіяних вузлів, вид транспортної технології, архітектура мережі, розмір блоку даних канального рівня, тип використовуваного обладнання, кількість проміжних оптоелектронних перетворень, тип комутації, використання хвильових конверторів, кількість та вид регенераційних пунктів, кількість хвиль WDM систем. На основі цих критеріїв сформовано комплексний параметр енергоспоживання (1) для однорідних мереж та (2) – для гетерогенної багатошарової мережі. В залежності від типу досліджуваної інформаційної мережі кожен критерій, що входить у (1) та (2), розраховуватиметься за певними математичними виразами. Послідовність математичних дій, спрямованих на розв'язання завдань дослідження, формує універсальну методику розрахунку енергоспоживання.

У процесі побудови однорідної мережі комплексний параметр енергоспоживання визначається

$$P_{p.c.} = M \cdot (2 \cdot P_{Edge} + N \cdot P_O + K \cdot P_E + P_{ROE} + P_{d_time}) + P_{transp}, \quad (1)$$

де $P_{p.c.}$ – загальне енергоспоживання мережі під час передачі інформаційних даних, P_{Edge} – споживання граничним вузлом, P_O і P_E – проміжними вузлами без і з проміжним оптоелектронним перетворенням, відповідно; N і K – кількість вузлів без і з проміжним оптоелектронним перетворенням, M – кількість блоків даних; P_{transp} – витрати електроенергії (далі – просто «витрати») на відкриття наскрізних каналів, P_{ROE} – витрати на регенераційне обладнання, P_{d_time} – потужність, яка витрачається в умовах простоювання обладнання: тут і надалі одиницю вимірювання параметру енергоспоживання представлено у Ватах (Вт).

Сучасні інфокомунікаційні мережі володіють властивістю гетерогенності та багатошаровості. Трирівневу структуру транспортної інфокомунікаційної мережі з проміжним оптоелектронним перетворенням показано на рис. 1 та без проміжного оптоелектронного перетворення – на рис. 2.

Комплексний параметр енергоспоживання для цих систем може бути визначений як сумарні витрати електроенергії кожного із рівнів, що є альтернативою формулі (1)

$$P_{e.c.} = P_{\sum IP} + P_{\sum tr.l} + P_{\sum DWDM}, \quad (2)$$

де $P_{\Sigma IP}$ – сумарні витрати електроенергії пристроями мережевого рівня, $P_{\Sigma tr.l}$ – витрати каналного рівня, $P_{\Sigma DWDM}$ – сумарні витрати обладнання DWDM на фізичному рівні з кінця в кінець мережі.

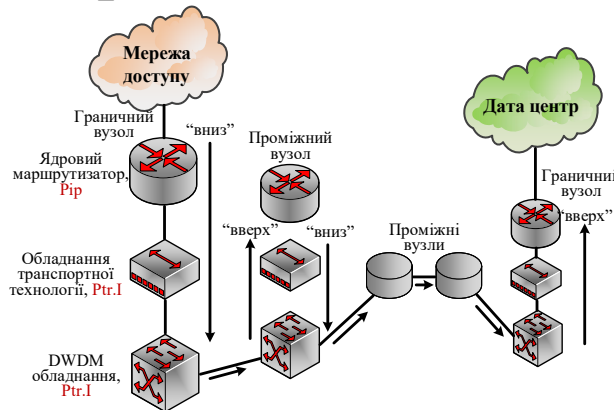


Рис. 1

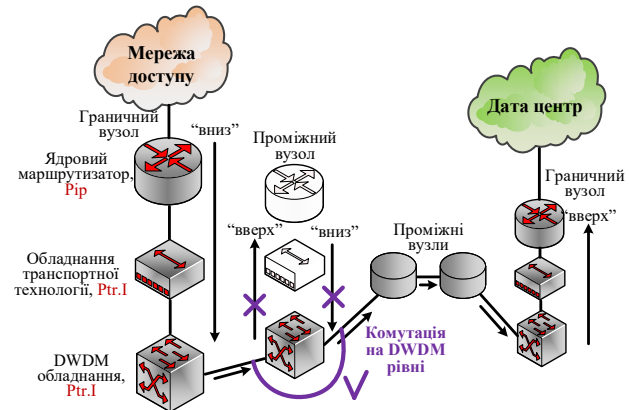


Рис. 2

Значення параметру енергоспоживання (Вт/біт) є відносно малою величиною, тому слід визначити, відносно якого блоку даних буде здійснюватися визначення цього параметру. Пропонуємо здійснювати розрахунок відносно блоку даних каналного рівня, оскільки розрахунок відносно IP пакету не дає змоги врахувати службову інформацію другого рівня, що вплине на розрахунок параметру енергоспоживання. В результаті задля визначення цього параметру слід скористатись формулою

$$P_{bit} = \frac{P_{p.c.}}{L_{block}} = \frac{M \cdot (2 \cdot P_{Edge} + N \cdot P_0 + K \cdot P_E + P_{ROE} + P_{d_time}) + P_{transp}}{L_{block}}, \quad (3)$$

де L_{block} – довжина блоку даних каналного рівня (кількість біт блоку).

Для визначення споживання пристроїв, наведених у формулі (3), в методиці пропонується розділити енергетичне споживання пристроїв електричного і оптичного доменів. Розподіл відносно доменів здійснюється в залежності від виду сигналу, з яким працює пристрій. Відповідно для електричного домену мережі витрати задля обробки одного блоку даних становитимуть

$$P_{eqp.el(IP, tr.l)} = \frac{P_{max}}{N}, \quad (4)$$

де P_{max} – витрати мережевим пристроєм у разі його максимального завантаження (Вт/с), N – кількість блоків даних, яку може обробити пристрій (за 1 с).

Для пристроїв, що працюють на мережевому рівні (маршрутизатор), P_{max} визначається як [19]

$$P_{max}(v) = P_{Chas}(v) + \sum_{u=0}^{U_{Proc}} P_{Proc}(v_u) + \sum_{i=0}^{N_{LC}} P_{LC}(v_i), \quad (5)$$

де v – тип шасі, контролера, встановлених лінійних карт, конфігурації і профілю трафіку пристрою в залежності від швидкості передавання даних в компонентах маршрутизатора. Функція $P_{Chas}(v)$ визначає енергетичне споживання шасі, U_{Proc} – кількість використовуваних контролерів, $P_{Proc}(v_u)$ – енергетичне споживання певного типу контролера, N_{LC} – кількість використовуваних лінійних карт, $P_{LC}(v_i)$ – енергоспоживання всіх лінійних карт в базовій конфігурації (фізичних інтерфейсів, портових адаптерів, комутаційних фабрик і модулів управління). Сума P_{LC} представляється у вигляді

$$\sum_{i=0}^{N_{LC}} P_{LC}(v_i) = \sum_{j=0}^{J_{PLIM}} P_{PLIM}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{SW}} P_{SW}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{MSC}} P_{MSC}(v_j), \quad (6)$$

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

Отже, функція, яка визначає енергоспоживання пристрою мережевого рівня, має вигляд

$$P_{max}(v) = P_{Chas}(v) + \sum_{u=0}^{U_{Proc}} P_{Proc}(v_u) + \sum_{j=0}^{J_{PLIM}} P_{PLIM}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{SW}} P_{SW}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{MSC}} P_{MSC}(v_j). \quad (7)$$

Збільшення швидкості передачі вимагає більш продуктивних і швидкодіючих елементів. У разі збільшення швидкості передачі відбувається досить суттєве збільшення енергоспоживання контролера і лінійних карт маршрутизатора.

Для оптичного домену потужність, яка витрачається задля обробки одного блоку даних, визначається за формулою

$$P = P_{equip.op}(t) \cdot \frac{L_{block}}{V}, \quad (8)$$

де $P_{equip.op}(t)$ – витрати пристроєм каналного рівня за одиницю часу, V – швидкість передачі оптичного сигналу в мережі (в бітах за секунду).

На рис. 3 показано структуру акустооптичного комутатора, згідно з якої наведено формули розрахунку енергоспоживання.

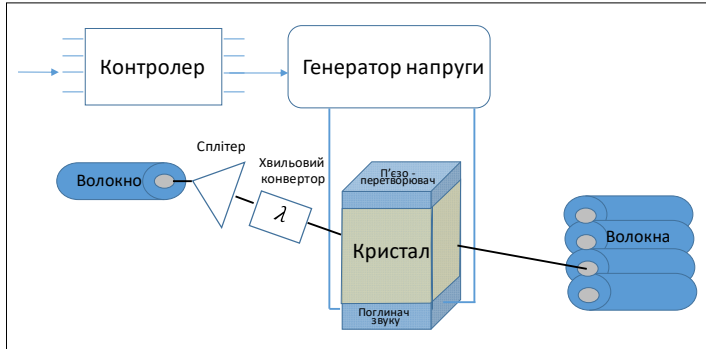


Рис. 3

Енергетичне споживання запропонованої архітектури пристрою визначається за формулою

$$P_{equip.switch}(v) = P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{wave}(v) + P_{cool}(v), \quad (9)$$

де $P_{proc}(v)$ – енергоспоживання контролера, $P_{genV}(v)$ – генератора напруги, $P_{wave}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на хвильову конвертацію, $P_{cool}(v)$ – електроенергія на охолодження комутатора

$$P_{cool}(v) = k_e \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{wave}(v)). \quad (10)$$

У [20] зазначено, що у разі споживанні комутатором 1 Вт електроенергії витрачається до 1 Вт електроенергії на його охолодження. Приймаємо параметр k_e в межах $0,5 \leq k_e \leq 1$, який визначає частку електроенергії, що припадає на охолодження від сумарного енергоспоживання комутатора.

Енергоспоживання генератора напруги $P_{genV}(v)$ визначається наступним чином:

$$P_{genV}(v) = \int I \cdot U_{manag}(t) dt, \quad (11)$$

де U_{manag} – керуюча напруга, що подається на комутатор. Для акустооптичного комутатора вона змінюється у діапазоні $0 < U_{manag} < U_{acous}$. Максимально допустима керуюча напруга генератора U_{acous} , необхідна задля забезпечення режиму Брега, визначається формулою

$$U_{acous} = \frac{\tilde{\lambda}}{\pi \cdot f_p \cdot d_{ij} \cdot Q_m} \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot H_n}{M_2 \cdot L_a \cdot 3,2 \cdot b_a \cdot l_a \cdot Z_{36}}}, \quad (12)$$

де b_a і l_a – ширина і довжина звукового стовпа, Z_{36} – акустичний опір матеріалу звукопроводу, f_p – резонансна частота п'єзоперетворювача, d_{ij} – п'єзомодуль матеріалу п'єзоперетворювача, Q_m – механічна добротність п'єзоперетворювача, L_a – довжина акустооптичної взаємодії, M_2 – коефіцієнт АО, H_n – ширина п'єзоперетворювача

На наступному етапі за методикою визначається енергетичне споживання граничних і проміжних вузлів. На граничних вузлах процес обробки інформації здійснюється в одному напрямку, відповідно енергетичне споживання визначається на вхідному $P_{Edge_{input}}$ та

вихідному вузлах $P_{Edge_{output}}$ за формулами

$$P_{Edge_{input}} = P_{IP} + P_{tr.l} + P_{modulator_{DWDM}}, \quad (13)$$

$$P_{Edge_{output}} = P_{IP} + P_{tr.l} + P_{receiver_{DWDM}}, \quad (14)$$

де $P_{modulator_{DWDM}}$, $P_{receiver_{DWDM}}$ – витрати електрооптичного модулятора та фотоприймача відповідно.

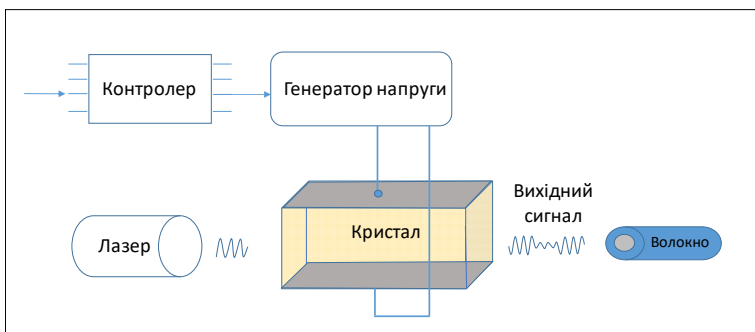


Рис. 4

Виходячи із структури електрооптичного модулятора (рис. 4), його енергоспоживання становитиме

$$P_{modulator_{DWDM}}(v) = P_{proc}(v) + P_{genV_m}(v) + P_{cool}(v), \quad (15)$$

де $P_{proc}(v)$, $P_{genV}(v)$ – енергоспоживання контролера та електричного сигналу відповідно, $P_{cool}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на охолодження модулятора

$$P_{cool}(v) = k_e \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV_m}(v)). \quad (16)$$

З врахуванням (16) формула (15) має вигляд

$$P_{modulator_{DWDM}}(v) = (k_e + 1) \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV_m}(v)). \quad (17)$$

Миттєве енергоспоживання генератора $P_{genV}(v)$ дорівнює добутку миттєвих значень напруги і струму. Керуюча напруга має максимальне значення $U_{manag}(t)$ для симетричної структури електрооптичного модулятора. Загальне енергетичне споживання генератора для структури електрооптичного модулятора напруги визначається наступною формулою:

$$P_{genV_m}(v) = \int I \cdot U_{manag}(t) dt, \quad (18)$$

де $0 < U_{manag} < U_{N/2}$.

Для проміжних вузлів визначення параметру енергоспоживання залежить від типу комутації на DWDM рівні, а також режиму передачі даних. Якщо такий вузол використовує електричну матрицю комутації на DWDM рівні, то зазвичай це також передбачає передачу всіх даних на верхні рівні для її обробки. У такому випадку споживання проміжного вузла з проміжним оптоелектронним перетворенням становить

$$P_E = P_{IP} + 2 \cdot P_{tr.l.} + P_{receiver_{DWDM}} + P_{modulator_{DWDM}}. \quad (19)$$

З формули (19) випливає

$$P_{\sum_{DWDM}} = \sum_{i=1}^{n+1} (P_{modulator_{DWDM_i}} + P_{receiver_{DWDM_i}}) + P_{\sum_{equip.}}, \quad (20)$$

де n – кількість транзитних вузлів, $P_{\sum_{equip.}}$ – енергоспоживання, яке витрачається на підсилювачі, ізолятори, конвертори та інші пристрої, що використовуються в мережі, без врахування енергоспоживання модуляторів та приймачів.

Відсутність проміжного оптоелектронного перетворення на таких вузлах свідчить про використання оптичної матриці комутації на DWDM рівні. Так, наприклад, для повністю оптичних мереж це вимагає відкриття наскрізних каналів між вузлом ініціатором з'єднання і вузлом одержувачем. Відповідно інформаційні блоки даних не виходять із оптичного домену. Відкриття такого каналу вимагає резервування часових і спектральних ресурсів мережі. Задля його відкриття відсилається певна кількість службових блоків даних (N_{signal}), для обробки яких витрачається потужність P_{transp} , що враховується у визначенні параметру енергоспоживання (формула (3)). Дані блоки резервують спектральні та частотні ресурси мережі. Відповідно витрачена енергія на вузлі без оптоелектронного перетворення становитиме

$$P_O = P_{sw} + P_{equip.}, \quad P_{transp} = N_{sign.} \cdot P_E, \quad (21,22)$$

де P_{sw} – енергія, витрачена оптичним комутатором, $P_{equip.}$ – на обладнання, зокрема атенюатори, фільтри та інші пристрої, крім комутаторів та пристроїв, які пов'язані з ним відповідно.

Як описано вище, споживання повністю оптичних комутаторів визначається споживанням оптичної матриці комутації, використанням хвильових конвекторів і оптичних підсилювачів. Відповідно, споживання таких пристроїв визначається

$$P_{sw} = (P_s + P_{wc} + P_{OA}) \cdot \frac{L_{block}}{V}, \quad (23)$$

де P_s – витрати електроенергії оптичним комутатором, P_{wc} – оптичним хвильовим конвертором за зміни довжини хвилі, P_{OA} – оптичним підсилювачем відповідно, V – швидкість передачі.

Енергетичне споживання регенераційного обладнання базується на використанні оптичних підсилювачів, а також і 3R регенераторів. Звідси визначаємо витрати електроенергії на один блок даних

$$P_{ROE} = \frac{L_{block}}{V} \cdot (Q \cdot P_{OA} + T \cdot P_{3R}), \quad (24)$$

де Q – кількість використаних оптичних підсилювачів та T – кількість 3R регенераторів від пункту А до пункту Б, P_{OA} – витрати оптичним підсилювачем за одиницю часу, P_{3R} – витрати електричним регенератором.

Задля визначення сумарного енергоспоживання інфокомунікаційної мережі необхідно розрахувати керуючу напругу для електрооптичного модулятора і акустооптичного комутатора. Керуюча напруга вибирається в межах від $0 < U_{manag} < U_{\lambda/2}$. Для електрооптичних матеріалів вона визначається півхвильовою напругою, при якій досягається зміна коефіцієнта пропускання [19],

$$U_{\lambda/2} = \frac{\lambda \cdot d}{2 \cdot n^3 \cdot r_{ij} \cdot L}, \quad (25)$$

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

Як видно із формули (25), за більшого значення електрооптичного коефіцієнту необхідна менша напруга для досягнення потрібної зміни коефіцієнта пропускання. Вихідними даними у розрахунку є $d=13,4$ мм, $L=18,5$ мм. Так за $r_{ij}=3,4 \cdot 10^{-12}$ м/В параметр півхвильової напруги $U_{\lambda/2} = 5588$ В [16]. Визначений у роботі [21] електрооптичний коефіцієнт кристалу ніобіту літія $r_{ij}=39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В у разі $d=13,4$ мм, $L=18,5$ мм, $\theta = 43^\circ$ дав змогу отримати $U_{\lambda/2} = 510,9$ В, що на 90,8% менше від попереднього. Це суттєво зменшує енергоспоживання такого пристрою.

Для акустооптичних пристроїв параметром, що визначає енергоспоживання, є η , який також визначає коефіцієнт передачі [23]

$$\eta = \frac{\pi^2}{2 \cdot \lambda^2} \cdot M_2 \cdot \frac{L}{H} \cdot P_a, \quad (26)$$

де M_2 – параметр акустооптичної якості, L – довжина акустичної взаємодії, H – висота ультразвукового п'єзоперетворювача, P_a – акустична потужність, яка визначається таким чином [24]

$$P_a = 6.4 \cdot b \cdot l \cdot Z_{se} \cdot f_p^2 \cdot d_{ij}^2 \cdot Q_m^2 \cdot U^2, \quad (27)$$

З формул (26) і (27) легко бачити, що за більшого значення параметру акустооптичної якості M_2 необхідна менша акустична потужність і, відповідно, менша керуюча напруга задля досягнення необхідного рівня коефіцієнта передачі пристрою. Значення керуючої напруги акустооптичного комутатора визначається за формулою (12).

Висновки. Визначено критерії, що впливають на енергоспоживання таких мереж з точки зору архітектурних і технологічних підходів, а саме кількість та структура задіяних вузлів, архітектура мережі, вид транспортної технології, розмір блоку даних, тип використовуваного обладнання, кількість проміжних оптоелектронних перетворень, тип комутації, використання хвильових конверторів, кількість та вид регенераційних пунктів, кількість хвиль WDM систем. На основі цих критеріїв розроблено універсальну методіку визначення комплексного параметру енергоспоживання інфокомунікаційних мереж. Використання даної методіки на практиці дасть змогу розрахувати енергоспоживання інфокомунікаційної мережі на етапі проектування з метою вибору оптимальних параметрів щодо побудови енергоефективної мережі із забезпеченням необхідної продуктивності, економічної ефективності та якості обслуговування користувачів.

Згідно з цією методикою об'єктом дослідження може бути будь яка інфокомунікаційна мережа. Перспективою подальших досліджень є розроблення програмного забезпечення задля автоматизації запропонованої методіки розрахунку енергоспоживання з можливістю моделювання різних топологічних архітектур сучасних інформаційно-комунікаційних мереж.

1. Grandelag P. Energy-efficient cooling for telecom networks: Thermosiphon as energy savings generator. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. Osaka, 2015. Pp. 1-3.

2. Kahalo I., Beshley H., Beshley M., Panchenko O. Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, Ukraine, 2019. Pp. 1167-1170.

3. Elmighani J. M. H., Klein T., Hinton K., Nonde L, Lawey A. Q., El-Gorashi T. E. H., Musa M. O. I., X. Don . GreenTouch GreenMeter core network energy-efficiency improvement measures and optimization. In *IEEE/OSA*

Journal of Optical Communications and Networking. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. A250-A269.
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.00A250>

4. Hadi M., Pakravan M. R. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. 90-103. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000090>
5. Musa M., Elgorashi T., Elmoghani J. Bounds for energy-efficient survivable IP over WDM networks with network coding. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 5. Pp. 471-481. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000471>
6. Klymash M., Beshley H., Seliuchenko M., Beshley M. Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network. 4th International Scientific-Practical Conference *Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*. Kharkiv, Ukraine, 2017. Pp. 182-186.
7. Romanchuk V., Beshley M., Panchenko O., Arthur P. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes. 2nd International Conference on *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*. Lviv, Ukraine, 2017. Pp. 295-298.
8. Zong Y., Ou Y., Hammad A., Kondepudi K., Nejabati R., Simeonidou D., Liu Y., Guo L. Location-aware energy efficient virtual network embedding in software-defined optical data center networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 7. Pp. 58-70. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000B58>
9. Yeromenko V., Kochan O. The conditional least squares method for thermocouples error modeling. IEEE 7th International Conference on *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. Berlin, Germany, 2013. Pp. 157-162. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2013.6662661>
10. Memon A. K., Khan A. M., Musavi S. H. A., Kumar G., Memon A. L. 40Gbps DQPSK transmission system for high data rate energy efficient Next Generation Passive Optical Network (NGPON). International Conference on *Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*. Karachi, Pakistan, 2017. Pp. 1-8.
11. Musumeci F., Hmaity A., Tornatore M., Pattavina A. Energy efficiency in reliable optical core networks. IEEE Online Conference on *Green Communications (OnlineGreenComm)*. Piscataway, USA, 2015. Pp. 1-6.
12. Su J., Kochan O. Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015, Vol. 58. No 1. Pp. 86-89.
13. Ji Y., Zhang J.; Zhao Y., Li H., Yang Q., Ge C. Xiong Q., Xue D., Yu J., Qiu S. All Optical Switching Networks With Energy-Efficient Technologies From Components Level to Network Level. in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2014. Vol. 32. No 8. Pp. 1600-1614. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2335352>
14. Tucker R., Hinton K., Ayre R. Energy efficiency in cloud computing and optical networking. 38th European Conference and Exhibition on *Optical Communications*. Amsterdam, Holland, 2012. Pp. 1-32.
15. Musumeci F., Vismara F., Grkovic V., Tornatore M., Pattavina A. On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching. IEEE international Conference on *Communication*. Kyoto, Japan, 2011. Pp. 1-5.
16. Kaidan M., Andrushchak V., Pitsyk M. Calculation Model of Energy Efficiency in Optical Transport Networks. Second International Scientific-Practical Conference *Problems of Infocommunications Science and Technology*. Kharkiv, 2015. Pp. 167-170.
17. Тесик Ю. Ф., Карасинский О. Л., Мороз Р. Н. Комп'ютерне моделювання високовольтного цифро-аналогового перетворювача. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 1. С. 85-88.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.085>
18. Герцик С. М., Городжа А. Д., Мислович М. В., Подольцев О. Д., Сисак Р. М., Трошинський Б. О. Моделі хвильових процесів в об'єктах кінцевих розмірів та їхнє використання для діагностики електротехнічного обладнання. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 86-94.
DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.086>
19. Chabarek J., Sommers J., Barford P., Eitan C., Tsang D., Wright S. Power Awareness in Network Design and Routing. The 27th Conference on *Computer Communications*. Phoenix, 2008. Pp. 457-465.
20. Nhat V. V. M., Quoc N. H. A model of adaptive grouping scheduling in OBS core nodes. *Journal of Convergence*. 2014. Vol. 5. No 1. Pp. 9-13.
21. Лопатина П.С., Криштоп В.В. Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи. *Изв.Вуз.Приборостроение*. 2009. Т. 52. № 12. С. 67-71.
22. 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 in crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization in LiNbO3. *Optics & Lasers in Engineering*. 2009. Vol. 47. No 1. Pp.24-30.
23. Феделеш В.І., Стегура М.М., Юркін І.М., Бабирич П.П. Акустооптичні модулятори і дефлектори на основі халькогенідних стекол(As₂S₃)_{1-x}Hg(Ge)_x. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика*. Ужгород, 2009. № 26. С. 157-166.
24. Бондаренко В.С., Зоренко В.П., Чкалова В.В. Акустооптические модуляторы света. Москва. Радио и связь. 1988. 136 с.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ В ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Сонг Венгуанг¹, Андрушак В.С.², Кайдан Н.В.², Бешлей Н.И.², Кочан О.В.^{1,2}, Су Цзюнь³

¹ School of Computer Science, Yangtze University,
Jingzhou, 434023, China, e-mail: wenguang_song@yangtzeu.edu.cn.

² Национальный университет "Львовская политехника",
ул. Степана Бандеры, 12, Львов, 79013, Украина,
e-mail: mykola.i.beshlei@lpnu.ua; orestvk@gmail.com

³ School of Computer Science, Hubei University of Technology,
Wuhan, China.

Предложена методика определения комплексного параметра энергопотребления для инфокоммуникационных сетей. В отличие от известных предложенная методика учитывает гетерогенность и многослойность сети, а также параметр мощности, расходуемой во время простоя сетевого оборудования в процессе обработки служебных блоков данных, что является достаточно важной задачей для повышения точности определения энергопотребления на этапе внедрения энергоэффективной сети. Согласно данной методике расчет параметра энергопотребления можно проводить для любой архитектуры инфокоммуникационной сети, конфигурации сетевых устройств и для оборудования от различных производителей. Библ. 24, рис. 4.

Ключевые слова: энергопотребление, информационно коммуникационная сеть, DWDM, электрооптика, акустооптика, коммутатор, модулятор.

METHODOLOGY FOR CALCULATING THE ENERGY CONSUMPTION OF INFORMATION COMMUNICATION SYSTEMS

Song Wenguang¹, Andrushchak V.S.², Kaidan M.V.², Beshley M.I.², Kochan O.V.^{1,2}, Su Jun³

¹ School of Computer Science, Yangtze University,
Jingzhou, 434023, China, e-mail: wenguang_song@yangtzeu.edu.cn.

² Lviv Polytechnic National University,
Str. Stepana Bandera, 12, Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: mykola.i.beshlei@lpnu.ua; orestvk@gmail.com

³ School of Computer Science, Hubei University of Technology,
Wuhan, China.

The methodology for calculating the complex parameter of energy consumption for info-communication networks is proposed. Unlike the known methodologies, the proposed technique takes into account heterogeneity and multilayered network. It also takes into account the parameter of power consumption during the downtime of network equipment in the process of processing of service data blocks, which is quite an important task to improve the accuracy of energy consumption at the stage of implementing an energy-efficient network. According to this method, the energy consumption can be calculated for any network architecture and configuration, network devices configuration and equipment from different manufacturers. References 24, figures 4.

Keywords: power consumption, info-communication network, DWDM, electrooptics, acoustics, switch, modulator.

1. Grandelag P. Energy-efficient cooling for telecom networks: Thermosiphon as energy savings generator. *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. Osaka, 2015. Pp. 1-3.

2. Kahalo I., Beshley H., Beshley M., Panchenko O. Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Lviv, Ukraine, 2019. Pp. 1167-1170.

3. Elmirghani J. M. H., Klein T., Hinton K., Nonde L., Lawey A. Q., El-Gorashi T. E. H., Musa M. O. I., X. Don . GreenTouch GreenMeter core network energy-efficiency improvement measures and optimization. In *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. A250-A269.
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.00A250>

4. Hadi M., Pakravan M. R. Energy-efficient fast configuration of flexible transponders and grooming switches in OFDM-based elastic optical networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 2. Pp. 90-103. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000090>

5. Musa M., Elgorashi T., Elmirghani J. Bounds for energy-efficient survivable IP over WDM networks with network codin. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 5. Pp. 471-481.
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000471>

6. Klymash M., Beshley H., Seliuchenko M., Beshley M. Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network. 4th International Scientific-Practical Conference

Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T). Kharkiv, Ukraine, 2017. Pp. 182-186.

7. Romanchuk V., Beshley M., Panchenko O., Arthur P. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes. 2nd International Conference on *Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*. Lviv, Ukraine, 2017. Pp. 295-298.

8. Zong Y., Ou Y., Hammad A., Kondepu K., Nejabati R., Simeonidou D., Liu Y., Guo L. Location-aware energy efficient virtual network embedding in software-defined optical data center networks. in *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*. 2018. Vol. 10. No 7. Pp. 58-70. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOCN.10.000B58>

9. Yeromenko V., Kochan O. The conditional least squares method for thermocouples error modeling. IEEE 7th International Conference on *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS)*. Berlin, Germany, 2013. Pp. 157-162. DOI: <https://doi.org/10.1109/IDAACS.2013.6662661> .

10. Memon A. K., Khan A. M., Musavi S. H. A., Kumar G., Memon A. L. 40Gbps DQPSK transmission system for high data rate energy efficient Next Generation Passive Optical Network (NGPON). International Conference on *Innovations in Electrical Engineering and Computational Technologies (ICIEECT)*. Karachi, Pakistan, 2017. Pp. 1-8.

11. Musumeci F., Hmaity A., Tornatore M., Pattavina A. Energy efficiency in reliable optical core networks. IEEE Online Conference on *Green Communications (OnlineGreenComm)*. Piscataway, USA, 2015. Pp. 1-6.

12. Su J., Kochan O. Common mode noise rejection in measuring channels. *Instruments and Experimental Techniques*. 2015, Vol. 58. No 1. Pp. 86-89.

13. Ji Y., Zhang J.; Zhao Y., Li H., Yang Q., Ge C.Xiong Q., Xue D., Yu J., Qiu S. All Optical Switching Networks With Energy-Efficient Technologies From Components Level to Network Level. in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2014. Vol. 32. No 8. Pp. 1600-1614. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2335352>

14. Tucker R., Hinton K., Ayre R. Energy efficiency in cloud computing and optical networking. 38th European Conference and Exhibition on *Optical Communications*. Amsterdam, Holland, 2012. Pp. 1-32.

15. Musumeci F., Vismara F., Grkovic V., Tornatore M., Pattavina A. On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching. IEEE international Conference on *Communication*. Kyoto, Japan, 2011. Pp. 1-5.

16. Kaidan M., Andrushchak V., Pitsyk M. Calculation Model of Energy Efficiency in Optical Transport Networks. Second International Scientific-Practical Conference *Problems of Infocommunications Science and Technology*. Kharkiv, 2015. Pp. 167-170.

17. Tesik Yu.F., Karasinskii O.L., Moroz R.N. Computer simulation of high-voltage DAC. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2019. No 1. Pp. 85-88. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.01.085>

18. Hertsyk S.M., Gorodzha A.D., Myslovych M.V., Podoltsev O.D., Sysak R.M., Troshchynskiy B.O. Models of wave processes in objects of limited form and their use for diagnostics of electrotechnical equipment. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. No 2. Pp. 86-94. (Ukr). DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.086>

19. Chabarek J., Sommers J., Barford P., Estan C., Tsiang D., Wright S. Power Awareness in Network Design and Routing. The 27th Conference on *Computer Communications*. Phoenix, 2008. Pp. 457-465.

20. Nhat V. V. M., Quoc N. H. A model of adaptive grouping scheduling in OBS core nodes. *Journal of Convergence*. 2014. Vol. 5. No 1. Pp. 9-13.

21. Lopatina P.S., Krishtop V.V. Electro-optical modulator for fiber-optic communication lines. *Izvestiia VUZov. Priborostroenie*. 2009. Vol. 52. No 12. Pp. 67-71. (Rus).

22. 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 in crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization in LiNbO₃. *Optics & Lasers in Engineering*. 2009. Vo. 47. No 1. Pp.24-30.

23. Fedelezh V.I., Stegura M.M., Yurkin I.M., Babidorich P.P. Acousto-optical modulators and deflectors based on the chalcogenide glasses (As₂S₃)_{1-x}Hg(Ge)_x. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya Pfizika*. 2009. No 26. Pp. 157-166. (Ukr).

24. Bondarenko V.S., Zorenko V.P., Chkalova V.V. Acousto-optical light modulators. Moskva: Radio i sviaz, 1988. 136 p. (Rus)

Надійшла 05.12.2019
Остаточний варіант 29.04.2020