

Optymalizacja energooszczędnej sieci teleinformatycznej

Streszczenie. *Możliwość zarządzania zużyciem energii jest ważnym elementem nowoczesnych sieci i systemów teleinformatycznych. Wymaganie energooszczędności jest szczególnie istotne w przypadku wydajnych sieci szkieletowych i systemów przetwarzających dane w sposób rozproszony np. klastrów. W artykule zostanie zaprezentowany projekt dwuwarstwowego systemu sterowania energooszczędną siecią teleinformatyczną. Użyteczność proponowanego systemu została poddana weryfikacji na drodze obliczeń numerycznych.*

Abstract. *The energy awareness is an important aspect of modern networks and computing systems design and management, especially in the case of internet-scale networks and data intensive large scale distributed computing systems. In this paper, we have designed and developed a two-level control framework for reducing power consumption in computer networks. Utility of our framework have been verified by numerical experiments (Optimization of energy-aware computer network).*

Słowa kluczowe: teleinformatyczna sieć energooszczędna, ruting energooszczędny, inżynieria ruchu, optymalizacja sieci.

Keywords: energy-aware network, energy-aware routing, traffic engineering, network optimization.

Wstęp

Rola operatorów telekomunikacyjnych jako istotnych odbiorców energii elektrycznej systematycznie wzrasta wraz z wzrostem wolumenu danych przekazywanych w sieci. Wobec powyższego przewiduje się, że koszty związane z zapotrzebowaniem sieci teleinformatycznych na energię mogą wywrzeć istotny wpływ na rozwój usług teleinformatycznych. Koszty te wymienia się obecnie wśród przyczyn obserwowanego na świecie spadku tempa instalowania szybszych interfejsów sieciowych w punktach wymiany ruchu. Istotne znaczenie mają także aspekty ekologiczne, które związane są z redukcją emisji gazów cieplarnianych.

Przeważająca część energii elektrycznej pochłaniana jest w sieci teleinformatycznej przez urządzenia dostępne. Prezentowane w literaturze [1] wyniki analiz dotyczących statystycznego rozkładu kosztów zużycia energii elektrycznej w typowych architekturach sieci operatorskich wykazują, iż około 70% kosztów pochodzi od urządzeń końcowych i dostępowych, a pozostałe 30% jest wytwarzane przez rdzeń sieci operatora. Konieczne jest więc wdrożenie nowoczesnych technologii oszczędzania energii, głównie w warstwie dostępowej, ale również w pozostałych częściach sieci teleinformatycznej.

Głównym wyzwaniem jest zaprojektowanie i wdrożenie nowych technologii i metod, które pozwalają na zmniejszenie zużycia energii w tego typu infrastrukturze, co prowadzi do zmniejszenia kosztów utrzymania sieci teleinformatycznej. Stosowane strategie muszą uwzględniać rzeczywiste obciążenie sieci ruchem oraz wymagania dotyczące jakości usług (QoS) [2].

W ostatnich latach podjęto wiele inicjatyw, których celem jest redukcja kosztów energetycznych funkcjonowania sieci Internet. Jedną z takich inicjatyw był projekt ECONET (<http://www.econetproject.eu/>) [3] finansowany ze środków Komisji Europejskiej w ramach 7FP. Celem projektu było opracowanie oraz eksperymentalna weryfikacja prototypowych rozwiązań sprzętowych, interfejsów programistycznych oraz układów i algorytmów sterowania umożliwiających realizację koncepcji energooszczędnej architektury teleinformatycznej sieci przewodowej. Opracowano mechanizmy, które umożliwiają podniesienie wydajności energetycznej zarówno urządzeń końcowych i dostępowych, jak i szkieletowych [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

W artykule prezentowane są struktury i algorytmy sterowania siecią teleinformatyczną, uwzględniające możliwości oszczędzania energii oferowane przez nowoczesne urządzenia sieciowe. Optymalizacja trybu

pracy urządzeń w skali całej sieci teleinformatycznej dokonywana jest w strukturze warstwowej, przy czym reguły decyzyjne stosowane autonomicznie przez poszczególne urządzenia zależą od decyzji wyznaczanych przez jednostkę nadrzędną. W prezentowanej pracy szczególny uwagę zwrócono na użyteczność rezultatów działania systemu, do których należą energooszczędne ustawienia urządzeń sieciowych oraz energooszczędne trasowanie ruchu w sieci teleinformatycznej. Ostatnie rozdziały artykułu zawierają szczegółowe wyniki uzyskane dla średniej i dużej szkieletowej sieci teleinformatycznej.

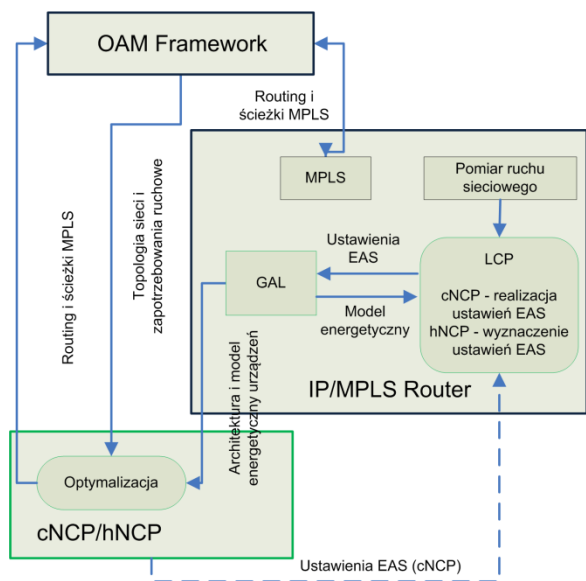
System sterowania siecią teleinformatyczną

Celem prezentowanych mechanizmów sterowania siecią teleinformatyczną jest ograniczenie zapotrzebowania na energię elektryczną niezbędną do jej normalnego funkcjonowania. Działania te nie powinny zaburzać pracy sieci, w szczególności nie powinny powodować obniżenia jakości oferowanych usług (QoS) [2]. Punkt wyjścia dla opracowanych rozwiązań stanowiły dwie nowoczesne technologie rozwijane w procesorach ruterów i kartach sieciowych nowych generacji: technologia skalowania częstotliwości i napięcia procesora (ang. *dynamic power scaling*) oraz technologia szybkiej hibernacji urządzenia (ang. *smart standby*). Pierwsza z technik umożliwiła dobranie wydajności urządzenia do panujących warunków, np. przez zmianę częstotliwości procesora czy pasma łącza (ang. *adaptive rate – AR*) lub też wyłączenie większości funkcji urządzenia na bardzo krótki czas między obsługą zdarzeń (ang. *low power idle – LPI*). Druga pozwala wyłączyć większość funkcji urządzenia na okres, gdy jego funkcje nie są potrzebne, zachowując jednak jego zdolność do automatycznego włączenia się przy zaobserwowanym zapotrzebowaniu.

Zaproponowany układ sterowania składa się z czterech warstw: OAM, NCP, LCP i GAL [9]. OAM (Operations, Administration and Maintenance) pełni funkcje warstwy pośredniczącej między pozostałymi komponentami systemu. Odpowiada za pomiary przepływów w sieci teleinformatycznej i ich dostarczanie do pozostałych komponentów systemu. NCP (*Network-wide Control Policy*) obejmuje swoim zasięgiem całą infrastrukturę sieciową. Zadaniem warstwy NCP jest wyznaczenie energooszczędnego trasowania pakietów w sieci teleinformatycznej oraz zalecanych trybów pracy wszystkich urządzeń sieciowych. Mechanizm NCP wykorzystuje technologie szybkiej hibernacji oraz skalowania częstotliwości i napięcia procesora. LCP (*Local Control Policy*) ma zasięg lokalny, ograniczony do pojedynczego

rutera. Zadaniem mechanizmów warstwy LCP jest wyznaczenie i ustawienie procesora rutera w odpowiedni tryb działania, w zależności od jego aktualnego obciążenia [14,15]. LCP wykorzystuje technologie skalowania częstotliwości i napięcia procesora. Mechanizmy LCP mają dostęp do pełnego drzewa komponentów wchodzących w skład danego urządzenia (np. rutera). Drzewo to oddaje zależności między komponentami – np. jeśli ruter pozwala na instalację szeregu kart, z których każda zawiera kilka interfejsów sieciowych (portów), liśćmi tego drzewa są interfejsy, węzłami pośrednimi karty, a korzeniem sam ruter. GAL (*Green Abstraction Layer*) to warstwa abstrakcji dostarczająca interfejs między warstwami OAM, NCP i LCP. Zadaniem GAL jest ujednoczenie sposobu zarządzania energią dla różnych typów urządzeń sieciowych.

W przedstawionej w pracy propozycji układu sterowania zakładamy, że dysponujemy nowoczesnymi energooszczędnymi urządzeniami, które mogą pracować w różnych stanach charakteryzujących się różnym poborem mocy. Podstawowym pojęciem jest więc stan energetyczny urządzenia (*energy aware state – EAS*) rozumiany podobnie jak ma to miejsce w przypadku specyfikacji ACPI (*Advanced Configuration and Power Interface*) [16]. Standard ACPI definiuje stany energetyczne urządzenia odpowiadające częstotliwościom taktowania zegara procesora oraz zakłada możliwość jego chwilowego wyłączenia. Każdy z określonych dla urządzenia stanów energetycznych charakteryzuje się zestawem parametrów dotyczących zużycia energii, jak również zakresem obsługiwanych prędkości transmisji, a więc przepustowości sieci.



Rys.1. Struktura sterowania (warianty cNCP i hNCP).

Prezentowany w pracy układ sterowania siecią teleinformatyczną zakłada istnienie nadrzędnej jednostki decyzyjnej. W zależności od wybranego wariantu sterowania wspomniana jednostka pełni funkcje centralnego decydenta (cNCP), bądź koordynatora (hNCP) dla lokalnych mechanizmów sterowania (LCP) działających w węzłach sieci. Koncepcja i działanie przykładowych mechanizmów LCP są prezentowane w pracach [14, 15]. W przypadku wariantu cNCP realizowane jest scentralizowane sterowanie urządzeniami tworzącymi sieć – jednostka centralna wyznacza optymalne stany energetyczne (EAS), w których powinny działać wszystkie urządzenia w sieci. W przypadku hNCP jednostka centralna

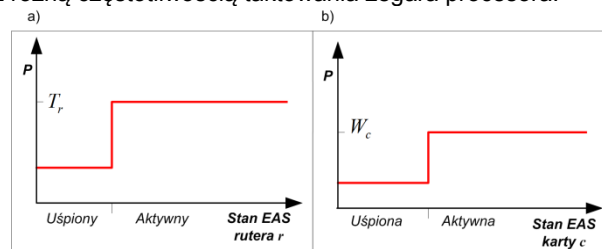
oblicza dla całej sieci optymalne, z punktu widzenia oszczędności energii, trasowanie ruchu w sieci, uwzględniając oczywiście wymagania na jakość usług oferowanych przez sieć. Zadanie polega na takim rozprowadzeniu ruchu, aby było możliwe przestawienie w stany niskoenergetyczne, a najlepiej w stany uśpienia jak największej liczby urządzeń sieciowych, takich jak routery, karty sieciowe, czy porty. Wyznaczenie decyzji wymaga danych dotyczących struktury sieci i jej funkcjonowania. Zakładamy, że jednostka centralna dysponuje wiedzą o topologii sieci i bieżących pomiarach obciążenia sieci oraz prognozowanymi wielkościami minimalnych zapotrzebowań na przepływność zgłaszaną przez routery brzegowe sieci. Schemat struktury sterowania prezentuje rysunek 1.

Zadanie realizowane przez jednostkę nadrzędną

Zadanie centralnego decydenta w sieci sprowadza się do wyznaczenia stanów pracy urządzeń sieciowych minimalizujących globalne zapotrzebowanie na energię elektryczną. W zależności od przyjętego modelu energetycznego urządzeń można sformułować różne zadania optymalizacji. W przypadku wszystkich kryteriów stanowi zużycie energii przy zachowaniu poprawnego działania sieci. Rozważano różne warianty [4] – od zadania z dyskretnymi zmiennymi decyzyjnymi zakładającego wyznaczanie pełnej tablicy trasowania, przez zadanie agregujące przepływy w ścieżki po zadanie, w którym zmienne decyzyjne są ciągłe. W niniejszej pracy prezentujemy podstawowe sformułowanie dyskretne z binarnymi zmiennymi decyzyjnymi oraz jego transformację do zadania ciągłego.

Linijowe zadanie optymalizacji dyskretnej (ZLD)

Rozważmy sieć zbudowaną z $r = 1, \dots, R$ routerów, $c = 1, \dots, C$ kart należących do routerów oraz $e = 1, \dots, E$ skierowanych łącz pomiędzy portami należącymi do tych kart. Założmy, że urządzenia mogą pracować w różnych stanach energetycznych ($k=1, \dots, K$): routery i karty sieciowe w dwóch stanach (aktywny i uśpiiony), porty, a tym samym połączenia między portami, w kilku stanach związanych z różną częstotliwością taktowania zegara procesora.



Rys.2. Przykładowe stany energetyczne routera (a) i karty sieciowej (b), gdzie P - moc.

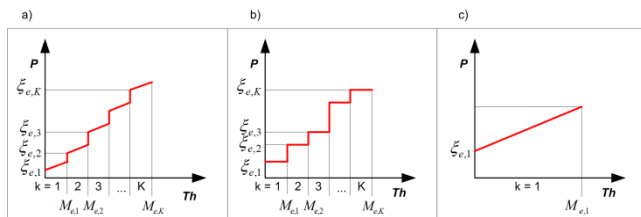
Dodatkowo przyjmujemy, że $d = 1, \dots, D$ oznacza liczbę rezerwacji (in. zapotrzebowanie) na transmisję danych zgłaszanych przez węzły brzegowe sieci teleinformatycznej (odpowiadają im zestawiane ścieżki MPLS). Możemy sformułować następujące zadanie optymalizacji dyskretnej, w którym zmiennymi decyzyjnymi są sugerowane stany energetyczne urządzeń, kart i łączy:

$$(1) \quad \min_{x_c, y_{ek}, z_r, u_{ed}} \left\{ \begin{aligned} & \sum_e \sum_k \zeta_{ek} y_{ek} + \\ & + \sum_e \frac{\psi_e}{M_e} \left(\sum_d V_d u_{ed} - M_e \sum_{k=2} y_{ek} \right) + \\ & + \sum_c W_c x_c + \sum_r T_r z_r \end{aligned} \right\}$$

przy ograniczeniach:

$$\begin{aligned}
(2) \quad & \forall_{e=1,\dots,E} \sum_k y_{ek} \leq 1, \\
(3) \quad & \forall_{\substack{d=1,\dots,D, \\ c=1,\dots,C}} \sum_p l_{cp} \sum_e a_{ep} u_{ed} \leq x_c, \\
(4) \quad & \forall_{\substack{d=1,\dots,D, \\ c=1,\dots,C}} \sum_p l_{cp} \sum_e b_{ep} u_{ed} \leq x_c, \\
(5) \quad & \forall_{\substack{r=1,\dots,R, \\ c=1,\dots,C}} g_{rc} x_c \leq z_r, \\
(6) \quad & \forall_{\substack{d=1,\dots,D, \\ p=s_d}} \sum_e a_{ep} u_{ed} - \sum_e b_{ep} u_{ed} = 1, \\
(7) \quad & \forall_{\substack{d=1,\dots,D, \\ p \neq s_d, p \neq t_d}} \sum_e a_{ep} u_{ed} - \sum_e b_{ep} u_{ed} = 0, \\
(8) \quad & \forall_{\substack{d=1,\dots,D, \\ p=t_d}} \sum_e a_{ep} u_{ed} - \sum_e b_{ep} u_{ed} = -1, \\
(9) \quad & \forall_{e=1,\dots,E} \sum_d V_d u_{ed} \leq M_e \sum_k y_{ek}.
\end{aligned}$$

Parametry występujące w powyższym sformułowaniu przyjmują wartości 0 lub 1: $g_{rc} = 1$, jeżeli karta c należy do routera r , $l_{cp} = 1$, jeżeli port p należy do karty c , $a_{ep} = 1$, jeżeli skierowane łącze e wychodzi z portu p , $b_{ep} = 1$, jeżeli skierowane łącze e wchodzi do portu p . Pozostałe stałe to: V_d – wielkość zapotrzebowania, s_d i t_d węzły źródłowy i końcowy zapotrzebowania d , T_r i W_c stałe koszty energetyczne routera i karty. M_e oznacza pojemność modułu łącza e , o którą wzrasta przepustowość łącza e przy zwiększeniu stanu energetycznego, ζ_{ek} stały koszt energetyczny łącza e w stanie energetycznym k , a Ψ_e dynamiczny koszt energetyczny łącza e .



Rys.3. Przykładowe stany energetyczne łącza e : a) $\Psi_e > 0$, $K > 1$ b) $\Psi_e = 0$, c) $K = 1$, (P - moc, Th - przepustowość).

Zmienne występujące w zadaniu oznaczają odpowiednio: $u_{de} \in [0,1]$ część zapotrzebowania d realizowana na łączu e , $y_{ek} \in [0,1]$ wykorzystane pasmo łącza e pracującego w stanie energetycznym k , $x_c \in [0,1]$ i $z_r \in [0,1]$ część zasobów, odpowiednio karty c i routera r wykorzystanych do przesłania danych.

Znaczenie ograniczeń jest następujące. Ograniczenia (2) gwarantują, że każde połączenie może w danej chwili pracować tylko w jednym stanie, (3)-(5) określają liczbę aktywnych ruterów, kart i portów. Ograniczenia (6)-(8) wynikają z praw Kirchhoffa dla źródła ruchu, jego odbiorcy oraz węzłów pośredniczących w transmisji, ograniczenie (9) gwarantuje nieprzekroczenie pojemności łącza.

Zadanie optymalizacji (1)-(9) może być rozwiązane za pomocą klasycznych algorytmów podziału i ograniczeń. Niestety jest to sformułowanie NP-trudne. Ogromne kłopoty pojawiają się w przypadku prób zastosowania tego typu podejścia do dużych sieci. Konieczne jest wówczas uproszczenie prezentowanego sformułowania oraz zastosowanie algorytmów wykorzystujących heurystyki.

Liniowe zadanie optymalizacji ciągłej (ZLC).

Zadanie (1) - (9) zostało zrelaksowane w następujący sposób. Binarne zmienne decyzyjne zastąpiono ciągłymi. Dodatkowo w nowym sformułowaniu wartości M_{ek} i ζ_{ek} oznaczające przepustowość oraz pobór mocy przez łącze e w stanie k są wyrażone poprzez różnicę wartości odpowiadających kolejnym stanom, tj. $M_{ek} = load_e(k) - load_e(k-1)$ i $\zeta_{ek} = pow_e(k) - pow_e(k-1)$, gdzie $load_e(k)$ oznacza przepustowość łącza e w stanie k , a $pow_e(k)$ pobór mocy przez łącze e w stanie k . Możemy teraz sformułować liniowe zadanie optymalizacji z ciągłymi zmiennymi decyzyjnymi x_c , y_{ek} , z_r , u_{ed} .

$$(10) \quad \min_{x_c, y_{ek}, z_r, u_{ed}} \left\{ \begin{aligned} & \sum_e \sum_k \zeta_{ek} y_{ek} + \\ & + \sum_e \frac{\Psi_e}{M_e} \left(\sum_d V_d u_{ed} - M_e \sum_{k=2} y_{ek} \right) + \\ & + \sum_c W_c x_c + \sum_r T_r z_r \end{aligned} \right\}$$

przy ograniczeniach (5) – (9) oraz dodatkowo:

$$(11) \quad \forall_{e=1,\dots,E} y_{e1} \geq \dots \geq y_{ei} \geq \dots \geq y_{eK},$$

$$(12) \quad \forall_{\substack{e=1,\dots,E, \\ k=1,\dots,K, c=1,\dots,C}} \sum_p l_{cp} a_{ep} y_{ek} \leq x_c,$$

$$(13) \quad \forall_{\substack{e=1,\dots,E, \\ k=1,\dots,K, c=1,\dots,C}} \sum_p l_{cp} b_{ep} y_{ek} \leq x_c.$$

W powyższym sformułowaniu dopuszczamy możliwość naruszania w procesie optymalizacji ograniczenia (2) – każde połączenie może w danej chwili pracować w kilku stanach. Sumaryczna przepustowość jest wyznaczana zgodnie z formułą (11). Ograniczenia (12) i (13) forsują binarne wartości zmiennych z_r , x_c w przypadku, gdy y_{ek} przyjmuje wartości binarne.

Do rozwiązania zadania (10)-(13) zaproponowano dwufazowy algorytm wykorzystujący klasyczne algorytmy liniowej optymalizacji. Jego szczegółową postać przedstawiono w pracy [9]. Działanie algorytmu jest następujące. W pierwszej fazie wyznaczone jest, za pomocą solwera liniowego, przybliżone rozwiązanie. Następnie zadanie jest modyfikowane i obliczenia są powtarzane do momentu uzyskania zmiennych decyzyjnych o wartościach 0 lub 1.

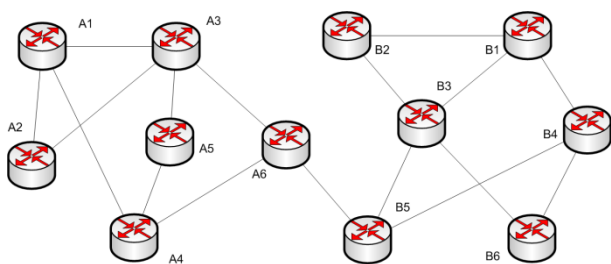
Przykładowe sieci i wyniki obliczeń

Zadanie ZLD lub ZLC jest rozwiązywane przez jednostkę centralną w celu wyznaczenia optymalnych lub możliwie bliskich optymalnym decyzji, które są następnie przekazywane do warstw OAM i LCP. W przypadku struktury scentralizowanej cNCP wielkościami sterującymi są wyznaczone stany energetyczne urządzeń i dodatkowo rutnig MPLS. W przypadku struktury z koordynatorem hNCP na podstawie obliczonych stanów urządzeń wyznaczana jest tablica trasowania ruchu, która określa ścieżki przekazywania pakietów danych. Następnie na podstawie zaobserwowanego poziomu ruchu w sieci mechanizm LCP dobiera odpowiedni tryb pracy urządzeń sieciowych.

Mechanizmy ZLD oraz ZLC zostały zastosowane do optymalizacji działania kilku przykładowych sieci teleinformatycznych o różnej wielkości i topologii. Do rozwiązania zadań optymalizacji zastosowano solwer Lp_solve [17]. Założono, że rutery i karty sieciowe mogą

pracować w dwóch stanach energetycznych: *aktywny* i *uśpiony* (rys. 2), a porty mogą być w jednym z pięciu stanów ($k = 1, 2, 3, 4, 5$) różniących się dostępną przepustowością i odpowiednio stałym dla stanu zużyciem energii (rys. 3b). Wszystkie eksperymenty przeprowadzono na komputerze Intel Core i7-3612QM CPU, 2.1 GHz, 8GB RAM. Celem badań była ocena użyteczności heurystycznego mechanizmu ZLC oraz weryfikacja rezultatów jego zastosowania do obniżenia zużycia zasobów energii wymaganej do działania sieci. W pracach [9,11,12,13] wykazano, że rozwiązanie zadania ZLD z odpowiadającymi rzeczywistości parametrami ruchu w sieci, jest możliwe tylko dla małych sieci składających się z kilku ruterów. Wydajność algorytmu rozwiązywania zadania ZLC jest znacznie większa. W związku z tym, w przypadku małych sieci sugeruje się stosowanie ZLD, w przypadku sieci złożonych - podejście ZLC.

W kolejnych paragrafach prezentowane są wyniki mechanizmu ZLC uzyskane dla średniej i dużej sieci szkieletowej.



Rys.4. Sieć testowa składająca się z 12 ruterów szkieletowych

Przykład Net1. Pierwszą serię badania przeprowadzono dla sieci Net1 zbudowanej z 12 ruterów zawierających łącznie 20 kart i połączonych 42 łączami (rys. 4). Przyjęto, że ruter w stanie aktywnym zużywa 1900 W, w stanie uśpienia 100 W, a karta sieciowa w stanie aktywnym 90 W i w stanie uśpienia 10 W. Założono następujące przepustowości łączy e i zapotrzebowania na moc w stanach $k = 1, 2, 3, 4, 5 - M_{ek}$: 200 Mb/s, 400 Mb/s, 600 Mb/s, 800 Mb/s, 1000 Mb/s, ζ_{ek} : 16 W, 32 W, 48 W, 64 W, 80 W.

Ze względu na dużą złożoność oryginalnego zadania ZLD, nie udało się otrzymać jego rozwiązania. Przyjmując liczby zapotrzebowań zgłaszanych przez węzły brzegowe równe $D=21$ otrzymujemy zadanie zrelaksowane ZLC o liczbie zmiennych = 1124 oraz liczbie ograniczeń = 1457. Uzyskany czas obliczeń to około 7,5 sekundy.

Porównanie maksymalnego możliwego zużycia energii przez sieć Net1 z wynikiem uzyskanym dzięki rozwiązaniu zadania ZLC znajduje się w tabeli 1. Sumaryczna redukcja mocy wyniosła 7188 W. W tabeli 2 prezentowane są dodatkowo wyznaczone stany energetyczne poszczególnych łączy sieci Net1.

Tabela 1. Redukcja zużycia energii w sieci Net1

Urządzenia	Liczba aktywnych urządzeń		Moc [W]		Redukcja [W]
	Max.	ZLP	Max.	ZLP	
Rutery	12	10	22800	19000	3800
Karty	20	14	1800	1260	540
Łącza	42	22	3360	512	2848

Tabela 2. Wynikowe stany energetyczne łączy w sieci Net1

Łącze (ruter/karta)	EAS (indeks k)	Przepustowość [Mb/s]	Moc [W]
A1/2 → A2/2	1	200.0	16.0
A1/2 → A3/1	2	400.0	32.0
A2/2 → A3/1	2	400.0	32.0

A3/2 → A5/1	1	200.0	16.0
A3/2 → A6/1	2	400.0	32.0
A2/2 → A1/2	1	200.0	16.0
A3/1 → A1/2	2	400.0	32.0
A3/1 → A2/2	2	400.0	32.0
A5/1 → A3/2	1	200.0	16.0
A6/1 → A3/2	2	400.0	32.0
B1/2 → B2/2	1	200.0	16.0
B1/2 → B3/1	2	400.0	32.0
B2/2 → B3/1	1	200.0	16.0
B3/2 → B5/1	1	200.0	16.0
B3/2 → B6/1	2	400.0	32.0
B2/2 → B1/2	1	200.0	16.0
B3/1 → B1/2	2	400.0	32.0
B3/1 → B2/2	1	200.0	16.0
B5/1 → B3/2	1	200.0	16.0
B6/1 → B3/2	2	400.0	32.0
A6/2 → B6/2	1	200.0	16.0
B6/2 → A6/2	1	200.0	16.0

W tabeli 3 zapisano przyjętą w obliczeniach macierz ruchu (kolumna 1) i wyznaczone ścieżki MPLS odpowiadające poszczególnym zapotrzebowaniom.

Tabela 3. Przyjęta macierz ruchu oraz jej realizacja (ruting MPLS) w sieci Net1

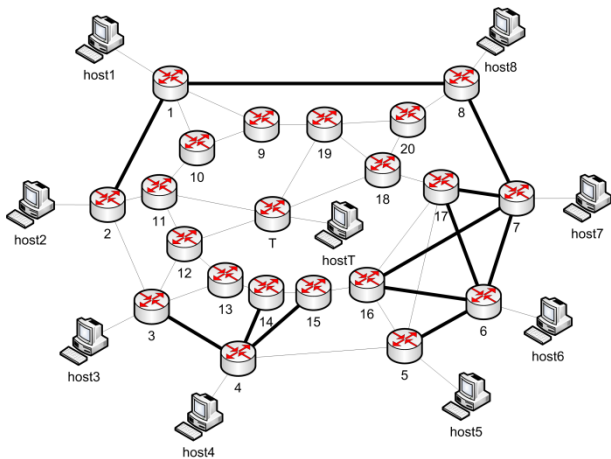
Zapotrzebowanie (Mb/s)	Ruting MPLS
A1 → A6 (100)	A1/2 → A3/1 → A6/1
A1 → A2 (100)	A1/2 → A2/2
A1 → A6 (100)	A1/2 → A3/1 → A6/1
A1 → A5 (100)	A1/2 → A2/2 → A3/1 → A5/1
A2 → A6 (100)	A2/2 → A3/1 → A6/1
A2 → A6 (100)	A2/2 → A3/1 → A6/1
A2 → A5 (100)	A2/2 → A1/2 → A3/1 → A5/1
B1 → B6 (100)	B1/2 → B3/1 → B6/1
B1 → B2 (100)	B1/2 → B2/2
B1 → B6 (100)	B1/2 → B3/1 → B6/1
B1 → B5 (100)	B1/2 → B3/1 → B5/1
B2 → B6 (100)	B2/2 → B1/2 → B3/1 → B6/1
B2 → B6 (100)	B2/2 → B1/2 → B3/1 → B6/1
B2 → B5 (100)	B2/2 → B3/1 → B5/1
A1 → B6 (5.0)	A1/2 → A3/1 → A6/1 → B6/2
B1 → A2 (5.0)	B1/2 → B3/1 → B6/1 → A6/2 → A3/2 → A2/2
B1 → A6 (5.0)	B1/2 → B3/1 → B6/1 → A6/2
A1 → B5 (5.0)	A1/2 → A3/1 → A6/1 → B6/2 → B3/2 → B5/1
B2 → A6 (5.0)	B2/2 → B1/2 → B3/1 → B6/1 → A6/2
A2 → B6 (5.0)	A2/2 → A1/2 → A3/1 → A6/1 → B6/2
B2 → A5 (5.0)	B2/2 → B1/2 → B3/1 → B6/1 → A6/2 → A3/2 → A5/1

Przykład Net2. Kolejne testy dotyczyły sieci Net 2 zbudowanej z 21 ruterów (13 tranzytowych, 8 dostępowych) połączonych 78 łączami (rys. 5), z dodatkowym ruterem stanowiącym połączenie do sieci Internet. Jest to przykładowa sieć operatora telekomunikacyjnego opisana w pracach [5, 18]. Przyjęto następujące wartości mocy ruterów i kart sieciowych:

- *stan aktywny*: ruter dostępowy - 1000 W, ruter tranzytowy - 3000 W, ruter łączący z Internetem 10000 W, karta sieciowa - 90 W,
- *stan uśpienia*: wszystkie rutery - 100 W, karta sieciowa - 10 W.

Założono dwa typy łączy: *linkT* (cienka linia na rys. 5) oraz *linkP* (pogrubiona linia na rys. 5). Przyjęto następujące przepustowości i pobory mocy przez oba rodzaje łączy w kolejnych stanach $k = 1, 2, 3, 4, 5$:

- *linkT*: przepustowość: 2 Gb/s, 4 Gb/s, 6 Gb/s, 8 Gb/s, 10 Gb/s; pobór mocy: 20 W, 40 W, 60 W, 80 W, 100 W,
- *linkP*: przepustowość: 2 Gb/s, 4 Gb/s, 6 Gb/s, 8 Gb/s, 10 Gb/s; pobór mocy: 1020 W, 1040 W, 1060 W, 1080 W, 1100 W.



Rys.5. Sieć testowa składająca się z 21 ruterów

Przyjmując liczby rezerwacji zgłaszanych przez węzły brzegowe równe $D=16$ oraz $D=72$ otrzymujemy zadania o następującej złożoności: ZLD dla $D=16$: liczba zmiennych = 1680, liczba ograniczeń = 1566; $D=72$: liczba zmiennych = 6048, liczba ograniczeń = 5094 oraz ZLC dla $D=16$: liczba zmiennych = 1680, liczba ograniczeń = 1956; $D=72$: liczba zmiennych = 6048, liczba ograniczeń = 5544. Jako macierz ruchu dla sieci Net2 zostały wykorzystane dane na temat zapotrzebowań na transmisję w sieci znajdujące się w opracowaniu [18].

Tabela 4. Redukcja zużycia energii w sieci Net2 - wariant $D=16$

Urządzenia	Liczba aktywnych urządzeń		Moc [W]		Redukcja [W]
	Max.	ZLP	Max.	ZLP	
Rutery	21	11	54000	24000	30000
Łącza	78	22	31800	11480	20320

Tabela 5. Redukcja zużycia energii w sieci Net2 - wariant $D=72$

Urządzenia	Liczba aktywnych urządzeń		Moc [W]		Redukcja [W]
	Max.	ZLP	Max.	ZLP	
Rutery	21	11	54000	24000	30000
Łącza	78	24	31800	13320	18480

Wyniki testów prezentują tabele 4 i 5. Czasy obliczeń wynosiły odpowiednio około 4 sekundy i 33 sekundy. Optymalne stany energetyczne zostały wyznaczone w wyniku rozwiązania zadania ZLC. Ze względu na dużą złożoność zadania optymalizacji nie uzyskano rozwiązania dla podstawowego sformułowania z binarnymi zmiennymi decyzyjnymi (ZLD).

Podsumowując wyniki badań przedstawione w powyższych tabelach można stwierdzić, iż sterowanie aktywnością urządzeń sieciowych pozwala na istotną redukcję całkowitego zapotrzebowania na energię, przy zachowaniu wymagań na jakość działania sieci. Redukcja ta zależy od topologii sieci oraz jej bieżącego obciążenia. Oczywiście największą oszczędność uzyskamy usypiając urządzenia (w szczególności rutery). Niestety, w dobrze zaprojektowanych sieciach rutery zazwyczaj muszą być cały czas aktywne.

Podsumowanie

Artykuł prezentuje mechanizmy wspierające decyzje administratora związane z planowaniem aktywności urządzeń sieciowych w celu zmniejszenia zużycia energii elektrycznej oraz algorytmy trasowania ruchu uwzględniające możliwość pracy urządzeń w różnych stanach charakteryzujących się różnym zużyciem energii. Wykonane badania eksperymentalne pokazują, że zaproponowane rozwiązania pozwalają na obniżenie

zużycia energii, a ich efektywność można poprawić, przy czym pole do kompromisu pomiędzy oszczędnością energii a utrzymaniem wymaganej jakości usług jest ograniczone.

Tabela 6. Wynikowe stany energetyczne łączy w sieci Net2

Łącze (ruter/karta)	EAS (indeks k)	Przepustowość [Gb/s]	Moc [W]
R4/1 → R3/1	8	6.0	1060.0
R3/1 → R4/1	8	6.0	1060.0
R11/1 → R2/1	3	6.0	60.0
R2/1 → R11/1	3	6.0	60.0
R3/1 → R2/1	2	4.0	40.0
R2/1 → R3/1	2	4.0	40.0
RT/1 → R11/1	3	6.0	60.0
R11/1 → RT/1	3	6.0	60.0
R12/1 → R3/1	5	10.0	100.0
R3/1 → R12/1	5	10.0	100.0
R1/1 → R2/1	8	6.0	1060.0
R2/1 → R1/1	8	6.0	1060.0
R8/1 → R7/1	7	4.0	1040.0
R7/1 → R8/1	7	4.0	1040.0
R7/1 → R6/1	7	4.0	1040.0
R6/1 → R7/1	7	4.0	1040.0
R5/1 → R6/1	6	2.0	1020.0
R6/1 → R5/1	6	2.0	1020.0
RT/1 → R12/1	5	10.0	100.0
R12/1 → RT/1	5	10.0	100.0
R5/1 → R4/1	2	4.0	40.0
R4/1 → R5/1	2	4.0	40.0
R1/1 → R8/1	7	4.0	1040.0
R8/1 → R1/1	7	4.0	1040.0

Podsumowując, stosowanie mechanizmów oszczędzania energii w skali całej sieci teleinformatycznej, zwłaszcza w jej rdzeniu może przynieść istotne oszczędności — wymaga jednak korzystania z algorytmów uwzględniających stopień komplikacji zadania oraz wielu zewnętrznych uwarunkowań (QoS, niezawodność sieci) i dlatego jak najbardziej uzasadnia potrzebę prowadzenia szeroko zakrojonych prac badawczych.

Tabela 7. Przyjęta macierz ruchu oraz jej realizacja (ruting MPLS) w sieci Net2

Rezerwacja ([Gb/s])	Ruting MPLS
R8 → R7 (0.01)	R8/1 → R7/1
R7 → R8 (0.01)	R7/1 → R8/1
R8 → R2 (0.02)	R8/1 → R1/1 → R2/1
R2 → R8 (0.02)	R2/1 → R1/1 → R8/1
R6 → R8 (0.03)	R6/1 → R7/1 → R8/1
R6 → R7 (0.03)	R6/1 → R7/1
R8 → R6 (0.03)	R8/1 → R7/1 → R6/1
R7 → R5 (0.03)	R7/1 → R8/1 → R1/1 → R2/1 → R3/1 → R4/1 → R5/1
R7 → R6 (0.03)	R7/1 → R6/1
R4 → R8 (0.03)	R4/1 → R5/1 → R6/1 → R7/1 → R8/1
R3 → R7 (0.03)	R3/1 → R2/1 → R1/1 → R8/1 → R7/1
R7 → R2 (0.03)	R7/1 → R6/1 → R5/1 → R4/1 → R3/1 → R2/1
R1 → R7 (0.03)	R1/1 → R8/1 → R7/1
R8 → R1 (0.03)	R8/1 → R1/1
R8 → R3 (0.03)	R8/1 → R1/1 → R2/1 → R3/1
R7 → R3 (0.03)	R7/1 → R8/1 → R1/1 → R2/1 → R3/1
R4 → R7 (0.03)	R4/1 → R5/1 → R6/1 → R7/1
R3 → R8 (0.03)	R3/1 → R2/1 → R1/1 → R8/1
R5 → R7 (0.03)	R5/1 → R6/1 → R7/1
R8 → R4 (0.03)	R8/1 → R7/1 → R6/1 → R5/1 → R4/1
R8 → R5 (0.03)	R8/1 → R7/1 → R6/1 → R5/1
R7 → R4 (0.03)	R7/1 → R6/1 → R5/1 → R4/1
R2 → R7 (0.03)	R2/1 → R1/1 → R8/1 → R7/1
R1 → R8 (0.03)	R1/1 → R8/1
R5 → R8 (0.03)	R5/1 → R6/1 → R7/1 → R8/1
R7 → R1 (0.03)	R7/1 → R8/1 → R1/1
R5 → R2 (0.05)	R5/1 → R4/1 → R3/1 → R2/1
R2 → R4 (0.05)	R2/1 → R3/1 → R4/1

R3 →R2 (0.05)	R3/1 → R2/1
R2 →R3 (0.06)	R2/1 → R3/1
R4 →R2 (0.06)	R4/1 → R3/1 → R2/1
R6 →R2 (0.06)	R6/1 → R5/1 → R4/1 → R3/1 → R2/1
R3 →R4 (0.06)	R3/1 → R4/1
R4 →R3 (0.06)	R4/1 → R3/1
R2 →R6 (0.06)	R2/1 → R3/1 → R4/1 → R5/1 → R6/1
R2 →R1 (0.06)	R2/1 → R1/1
R1 →R2 (0.06)	R1/1 → R2/1
R2 →R5 (0.06)	R2/1 → R3/1 → R4/1 → R5/1
R6 →R4 (0.07)	R6/1 → R5/1 → R4/1
R4 →R1 (0.07)	R4/1 → R5/1 → R6/1 → R7/1 → R8/1 → R1/1
R6 →R3 (0.07)	R6/1 → R5/1 → R4/1 → R3/1
R6 →R5 (0.07)	R6/1 → R5/1
R4 →R6 (0.07)	R4/1 → R5/1 → R6/1
R3 →R6 (0.07)	R3/1 → R4/1 → R5/1 → R6/1
R1 →R4 (0.07)	R1/1 → R8/1 → R7/1 → R6/1 → R5/1 → R4/1
R4 →R5 (0.07)	R4/1 → R5/1
R5 →R4 (0.07)	R5/1 → R4/1
R3 →R5 (0.07)	R3/1 → R2/1 → R1/1 → R8/1 → R7/1 → R6/1 → R5/1
R1 →R3 (0.07)	R1/1 → R8/1 → R7/1 → R6/1 → R5/1 → R4/1 → R3/1
R3 →R1 (0.07)	R3/1 → R2/1 → R1/1
R5 →R3 (0.07)	R5/1 → R4/1 → R3/1
R5 →R6 (0.07)	R5/1 → R6/1
R1 →R6 (0.08)	R1/1 → R8/1 → R7/1 → R6/1
R6 →R1 (0.08)	R6/1 → R7/1 → R8/1 → R1/1
R5 →R1 (0.08)	R5/1 → R4/1 → R3/1 → R2/1 → R1/1
R1 →R5 (0.08)	R1/1 → R8/1 → R7/1 → R6/1 → R5/1
RT →R8 (1.11)	RT/1 → R12/1 → R3/1 → R2/1 → R1/1 → R8/1
R8 →RT (1.11)	R8/1 → R7/1 → R6/1 → R5/1 → R4/1 → R3/1 → R2/1 → R1/1 → RT/1
RT →R7 (1.31)	RT/1 → R12/1 → R3/1 → R4/1 → R5/1 → R6/1 → R7/1
R7 →RT (1.31)	R7/1 → R8/1 → R1/1 → R2/1 → R11/1 → RT/1
R2 →RT (2.42)	R2/1 → R11/1 → RT/1
RT →R2 (2.42)	RT/1 → R12/1 → R3/1 → R2/1
RT →R4 (2.64)	RT/1 → R12/1 → R3/1 → R4/1
R4 →RT (2.64)	R4/1 → R3/1 → R12/1 → RT/1
RT →R3 (2.75)	RT/1 → R12/1 → R3/1
R3 →RT (2.75)	R3/1 → R12/1 → RT/1
RT →R6 (2.89)	RT/1 → R11/1 → R2/1 → R1/1 → R8/1 → R7/1 → R6/1
R6 →RT (2.89)	R6/1 → R7/1 → R8/1 → R1/1 → R2/1 → R11/1 → RT/1
RT →R5 (3.00)	RT/1 → R12/1 → R3/1 → R4/1 → R5/1
R5 →RT (3.00)	R5/1 → R4/1 → R3/1 → R12/1 → RT/1
R1 →RT (3.05)	R1/1 → R2/1 → R3/1 → R12/1 → RT/1
RT →R1 (3.05)	RT/1 → R11/1 → R2/1 → R1/1

Autor: dr inż. Andrzej Sikora, *Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa, ul. Kolska 12, 01-045 Warszawa, E-mail: andrzej.sikora@nask.pl*

LITERATURA

- [1] Bolla R., Bruschi R., Davoli F., Cucchiatti F., Energy Efficiency in the Future Internet: A Survey of Existing Approaches and Trends in Energy-Aware Fixed Network Infrastructures, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 13, (2011), 223–244
- [2] Gelenbe E., Lent R., Trade-offs between energy and quality of service, *Sustainable Internet and ICT for Sustainability, SustainIT 2012*, 4-5 October, 2012,
- [3] Bolla R., Bruschi R., Davoli F., Cucchiatti F., Setting the course of green Internet (letter to the Editor), *Science*, Vol. 342, No. 6164, AAAS, (2013), 1316
- [4] Arabas P., Malinowski K., Sikora A., On formulation of a network energy saving optimization problem, *Proc. of the 4th International Conference on Communications and Electronics (ICCE 2012)*, Vietnam (2012), 1-5
- [5] Bianzino A.P., Chiaraviglio L., Mellia M., GRIDA: a green distributed algorithm for backbone networks, *Proc. of Online Conference on Green Communications*, pp. 113-119, (2011)
- [6] Fisher W., Suchara M., Rexford J., Greening backbone networks: reducing energy consumption by shutting off cables in bundled links, *Proc. 1st ACM SIGCOMM workshop on Green networking (Green Networking'10)*, pp. 29-34 (2010)
- [7] Kamola M., Arabas P., Shortest Path Green Routing and the Importance of Traffic Matrix Knowledge, *Proc. of 24th Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications TIWDC - Green ICT* (2013)
- [8] Kołodziej J., Khan S.U., Wang L., Kisiel-Dorohinicki M., Madani S.A., Niewiadomska-Szynkiewicz E., Zomaya A.Y., Xu Ch.-Z., Security, energy, and performance-aware resource allocation mechanisms for computational grids, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 31, pp. 77-92 (2014)
- [9] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Sikora A., Arabas P., Kołodziej J., Control system for reducing energy consumption in backbone computer network, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, Vol. 25, No 12, pp. 1738-1754 (2012) DOI: 10.1002/cpe.2964
- [10] Shen G., Tucker R.S., Energy-minimized design for IP over WDM networks, *Journal of Optical Communications and Networking*, Vol. 1, pp. 176-186 (2009)
- [11] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Sikora A., Arabas P., Malinowski K., Energy-saving management in computer networks, *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 12, (2015), nr 3, (242-252)
- [12] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Sikora A., Arabas P., Kołodziej J., Control Framework for High Performance Energy Aware Backbone Network, *Proc. of European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2012)*, 490–496.
- [13] Niewiadomska-Szynkiewicz E., Sikora A., Arabas P., Kamola M., Mincer M. and Kołodziej J., Dynamic power management in energy-aware computer networks and data intensive computing systems, *Future Generation Comp. Syst.* 37 (2014): 284-296.
- [14] Karpowicz M., On the design of energy-efficient service rate control mechanisms: CPU frequency control for Linux, *Proc. of 24th Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications TIWDC - Green ICT* (2013)
- [15] Karpowicz M., Malinowski K., Mechanizm energooszczędnego sterowania częstotliwością pracy CPU dla systemu operacyjnego Linux, *Materiały XVIII Krajowej Konferencji Automatyki 2014* (2014)
- [16] HPC, Intel, Microsoft, Phoenix Technologies, Toshiba, *Advanced Configuration and Power Interface Specification, Revision 5.0* (2011)
- [17] Solver Ip_solve, <http://psolve.sourceforge.net/5.5/>
- [18] Fernández-Palacios J., Gutierrez N., Duque R., Soproni P., Cinkler T., Maliosz M., Fábregas L., Marzo J.-L., Caro F., Recovery in multipoint networks, *Deliverable D22, CELTIC TIGER project (phase 2)*, February, 2010.