

Mariusz Kamola
Piotr Arabas
Przemysław Jaskóła
Naukowa i Akademicka Sieć Komputerowa (NASK)
{Mariusz.Kamola,Piotr.Arabas,Przemyslaw.Jaskola}@nask.pl

Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz
Krzysztof Malinowski
Michał Karpowicz
Andrzej Sikora
Marcin Mincer
Michał Marks
Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej, Politechnika Warszawska
{ens,K.Malinowski,M.Karpowicz,A.Sikora,M.Mincer,M.Marks}@ia.pw.edu.pl

ECONET – energooszczędne sieci IP

Streszczenie: Przedstawiono aktualny stan prac nad energooszczędnymi technologiami transmisji w sieci IP, tworzonymi w projekcie 7PR, pn. ECONET. Prace wykonywane przez NASK i Politechnikę Warszawską obejmują opracowanie energooszczędnych strategii trasowania ruchu i sterowania podzespołami urządzeń sieciowych, do fazy testów prototypów. Zaprezentowano autonomiczną strategię sterowania częstotliwością zegara procesorów w systemie Linux i algorytm sterowania ruchem, uwzględniający hierarchiczną strukturę urządzeń sieciowych. Opisano również stanowiska testowe.

1. WPROWADZENIE

Dość powszechnie uważa się, że obserwowane obecnie tempo redukcji mocy elektrycznej potrzebnej do przetworzenia jednego bitu danych ruchu sieciowego jest zbyt niskie w stosunku do tempa wzrostu zapotrzebowania na przepustowość węzłów w sieci Internet. Wobec powyższego przewiduje się również, że koszty związane z rosnącym zapotrzebowaniem sieci na energię elektryczną, wynikające z rosnącego wykładniczo zapotrzebowania na przepustowość sieci, mogą wywrzeć istotny wpływ na rozwój usług teleinformatycznych. Istotnie, koszty te wymienia się obecnie wśród przyczyn obserwowanego na świecie spadku tempa instalowania nowych (szybszych) interfejsów sieciowych w punktach wymiany ruchu (IXP) [1], [2]. Niebagatelne znaczenie mają w tym kontekście także aspekty ekologiczne, związane z redukcją tzw. śladu węglowego (*carbon footprint*) infrastruktury teleinformatycznej.

W ostatnich latach podjęto wiele inicjatyw mierzących się z problemem redukcji kosztów energetycznych funkcjonowania sieci Internet. Wśród inicjatyw finansowanych ze środków Komisji Europejskiej (7FP) znalazł się projekt Econet [3]. W realizację projektu włączony jest Pion Naukowy NASK oraz Instytut Automatyki i Informatyki Stosowanej Politechniki Warszawskiej.

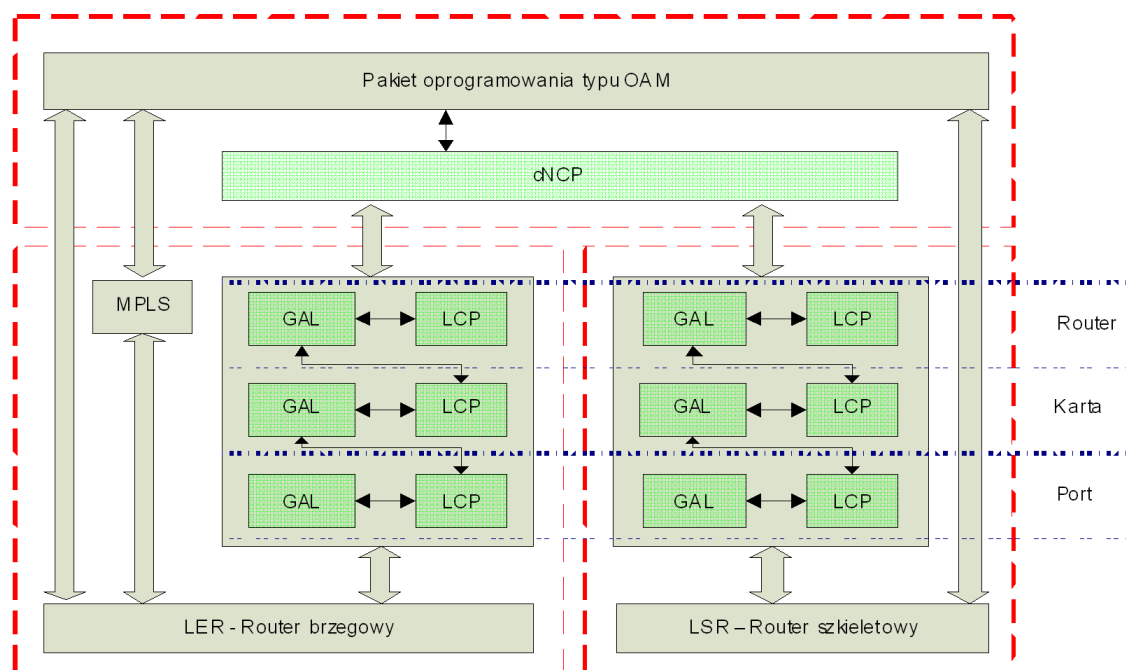
Celem projektu E jest opracowanie oraz przetestowanie prototypowych rozwiązań sprzętowych i programistycznych umożliwiających realizację koncepcji energooszczędnej architektury teleinformatycznej sieci

przewodowej. Zakłada się stworzenie mechanizmów redukujących zużycie energii elektrycznej nawet o 50% względem obecnie notowanego, przyczyniających się skutecznie do zrównoważenia tempa wzrostu wydajności energetycznej sieci i tempa wzrostu zapotrzebowania na jej przepustowość. Główne zadania badawcze i rozwojowe realizowane w ramach projektu skupione są na opracowaniu nowych technologii sprzętowych, interfejsów programistycznych oraz algorytmów sterowania pozwalających sieci efektywnie dostosowywać pobór energii do obserwowanego w danej chwili obciążenia oraz wymagań związanych z pożądanym poziomem jakości usług (QoS). Istotnym wynikiem będzie opracowanie koncepcji oraz implementacja w prototypowej sieci warstwy abstrakcji GAL (*Green Abstraction Layer*) adaptującej standard ACPI do charakterystyki pracy urządzeń sieciowych. Zadaniem interfejsu GAL będzie ujednolicenie sposobu zarządzania energią dla różnych typów urządzeń sieciowych.

W pracy [5] przedstawiono wyniki analiz dotyczących statystycznego rozkładu kosztów zużycia energii elektrycznej w typowych architekturach przewodowych sieci operatorskich. Analizy te wskazują wyraźnie, że aż 70% tych kosztów pochodzi od urządzeń końcowych i dostępowych. Rdzeń sieci wytwarza 30% kosztów zużycia energii elektrycznej. W projekcie ECONET opracowywane są mechanizmy, które umożliwią podniesienie wydajności energetycznej zarówno urządzeń końcowych i dostępowych, jak i szkieletowych.

W wyniku badań przeprowadzonych dotychczas przez zespół NASK/PW opracowane zostały innowacyjne mechanizmy sterowania pozwalające infrastrukturze sieci teleinformatycznej efektywnie dostosowywać pobór energii elektrycznej do obserwowanego w danej chwili natężenia ruchu oraz wymagań związanych z pożądanym poziomem jakości usług telekomunikacyjnych (QoS). Wstępne prace projektowe oraz analiza aktualnego stanu technologii zostały zaprezentowane na tych łamach przed rokiem [4].

Artykuł prezentuje dwa zasadnicze aspekty oszczędzania energii w sieci i opracowane, związane z nimi, technologie. Rozdział 2 przedstawia wyniki prac nad



Rys. 1. Struktura sterowania dla energooszczędnej sieci IP.

strukturą sterowania siecią w celu obniżenia zużycia zasobów energetycznych. W rozdziale 3 zaprezentowano algorytm wyznaczający optymalne trasy ruchu w sieci (na podstawie adresu docelowego oraz adresu źródłowego). Procedura ta uwzględnia hierarchiczną strukturę urządzeń i fakt, że największe oszczędności uzyskuje się wyłączając lub wprowadzając w głębokie uśpienie całe partie infrastruktury. W rozdziale 4 omówiono mechanizm sterowania szybkością pracy procesora w systemie Linux; podobny mechanizm może zostać wykorzystany w rozwiązaniach komercyjnych do sterowania zarówno jednostką centralną, jak i procesorem dedykowanym do obsługi portów na pojedynczej karcie. Rozdział 5 prezentuje w skrócie opracowywane w NASK środowisko testowe, jak również główne stanowisko projektu ECONET, w dziale badawczo-rozwojowym Telecom Italia w Turynie. Rozdział 6 stanowi podsumowanie prac i perspektyw dalszych prac badawczych i komercjalizacji wyników.

2. STRUKTURA I MECHANIZMY ENERGOOSZCZĘDNEGO STEROWANIA SIECIĄ

Bazę dla rozwiązań opracowanych w ramach projektu ECONET stanowią dwie nowoczesne technologie rozwijane w procesorach i kartach sieciowych nowych generacji:

- technologia szybkiej hibernacji (ang. *smart standby*),
- technologia skalowania częstotliwości i napięcia procesora (ang. *power scaling*).

Pierwsza z wymienionych technologii pozwala wyłączyć część funkcji urządzenia sieciowego na okres, gdy jego działanie nie jest niezbędne dla poprawnego funkcjonowania sieci. Zakłada się, że urządzenie ma zdolność automatycznego włączenia się w momencie kiedy pojawia się na niego zapotrzebowanie. Druga technologia zakłada możliwość dobrania wydajności urządzenia

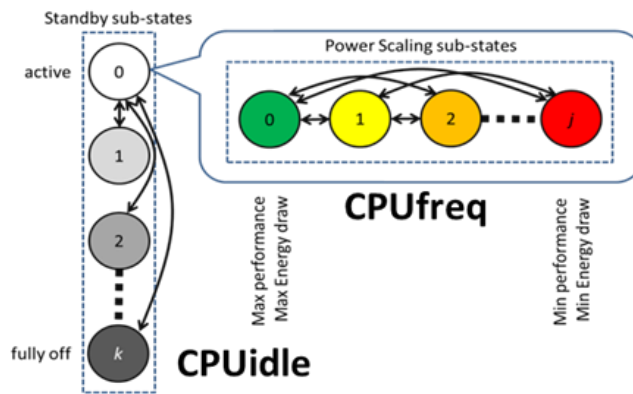
do bieżących warunków w sieci poprzez np. sterowanie częstotliwością procesora lub też wyłączanie większości funkcji urządzenia na bardzo krótki okres między obsługą zdarzeń.

Istotnym wynikiem projektu ECONET są struktura i mechanizmy sterowania siecią teleinformatyczną prowadzące do minimalizacji zużycia energii przez sieć w czasie jej normalnego funkcjonowania. Projektując system sterowania zwrócono szczególną uwagę na fakt, iż nie może on zaburzać pracy sieci, w szczególności nie powinien powodować obniżenia jakości oferowanych usług sieciowych.

Strukturę sterowania opracowaną w ramach projektu prezentuje rys. 1. Jest ona zbudowana z czterech głównych warstw: OAM, NCP, LCP i GAL. Warstwa OAM (*Monitoring and Operation Administration & Management*) pełni funkcje warstwy pośredniczącej między pozostałymi komponentami systemu. Jest m.in. odpowiedzialna za pomiary przepływów w sieci.

Zadaniem warstwy NCP (*Network-wide Control Policy*) jest wyznaczanie energooszczędnego routingu w sieci oraz/lub zalecanie trybów pracy urządzeń sieciowych. Decyzje warstwy NCP są obliczane dla całej sieci, na podstawie znanej topologii sieci, aktualnego jej obciążenia oraz szacowanego zapotrzebowania na poszczególne łącza. NCP wykorzystuje technologię szybkiej hibernacji oraz skalowania częstotliwości i napięcia procesora. Zadaniem mechanizmów zlokalizowanych w warstwie LCP (*Local Control Policy*) jest ustawianie urządzenia w odpowiedni tryb działania w zależności od bieżącego obciążenia urządzenia. LCP jest umieszczone bezpośrednio w urządzeniu sieciowym i wykorzystuje technologię skalowania częstotliwości i napięcia procesora.

Standardowy interfejs między OAM, NCP, LCP i urządzeniami sieciowymi zapewnia warstwa abstrakcji GAL (*Green Abstraction Layer*).



Rys. 2. Graf stanów CPU według standardu ACPI wraz z odpowiadającymi im modułami jądra systemu Linux

3. ENERGOOSZCZĘDNE STEROWANIE PROCESOREM W SYSTEMIE LINUX (WARSTWA LCP)

Technologia skalowania szybkości pracy procesora wykorzystana została w prototypowym module jądra systemu operacyjnego Linux. Zaprojektowany moduł, który stanowi mechanizm warstwy LCP, pozwala maszynom pracującym pod kontrolą systemu operacyjnego Linux na efektywne dobieranie szybkości wykonywania instrukcji, gwarantującej bezpieczną obsługę zadań przy minimalnym zużyciu energii elektrycznej. Prace nad nowymi mechanizmami sterowania szybkością CPU dla jądra systemu operacyjnego Linux poprzedziły eksperymenty badawcze, których rezultatem była ocena wydajności istniejących mechanizmów sterowania szybkością CPU zaimplementowanych w module **CPUfreq** jądra system operacyjnego Linux.

Dokonany wybór technologii umotywowany jest następująco. Po pierwsze, szybkie dopasowywanie częstotliwość (i napięcia) pracy procesora do bieżących potrzeb systemu operacyjnego, połączone z wprowadzaniem procesora w stan uśpienia w okresach bezczynności, obniża poziom zużycia energii elektrycznej przez system operacyjny. W jądrze systemu operacyjnego Linux realizację takiego trybu pracy procesora umożliwiają funkcjonujące równolegle mechanizmy modułów **CPUfreq** oraz **CPUidle**. Po drugie, system operacyjny Linux jest jedną z podstawowych platform obsługujących infrastrukturę sieciową. W rezultacie, ze względu na efekt skali, nawet niewielka poprawa efektywności pracy systemu może prowadzić do znacznych korzyści, w skali sieci lub w odpowiednio długim prze-

dziale czasu. Po trzecie, koszty modyfikacji i dystrybucji jądra systemu operacyjnego Linux są niskie w porównaniu z innymi technologiami.

Moduł **CPUfreq** odpowiada w systemie Linux za sterowanie szybkością pracy procesora (CPU). Udostępnia on zbiór sterowników przełączających tryb pracy procesora, P_k , $k=0, \dots, n$, określony standardem ACPI, któremu przypisana jest ustalona częstotliwość taktowania CPU – por rys. 2.

Moduł **CPUfreq** udostępnia następujące podstawowe sterowniki:

- **USERSPACE** – ręczny wybór częstotliwości z poziomu użytkownika systemu;
- **POWERSAVE** – ustawiana jest najniższa dopuszczalna częstotliwość taktowania;
- **PERFORMANCE** – ustawiana jest najwyższa dopuszczalna częstotliwość taktowania;
- **ONDEMAND/CONSERVATIVE** – automatyczny (na poziomie jądra) dobór częstotliwości do obserwowanego obciążenia.

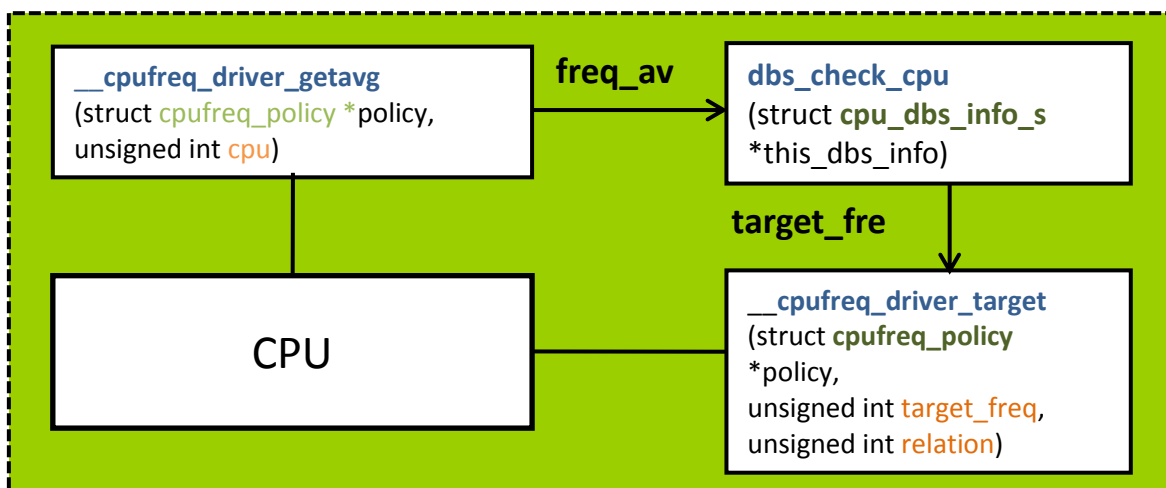
Przykładową konfigurację modułu **CPUfreq** prezentuje rys. 3. Na rys. 4 prezentowana jest badana pętla sterowania w tym module.

Należy zaznaczyć, że moduł **CPUfreq** odpowiada jedynie za stany dostępne w trybie aktywnym, C_0 , w którym procesor wykonuje instrukcje. Za wprowadzanie procesora w odpowiednio głęboki stan uśpienia (idle) w okresie bezczynności, C_l , $l=1, \dots, m$, w którym procesor nie wykonuje instrukcji, odpowiada moduł **CPUidle**, pracujący równolegle z modulem **CPUfreq**.

Przeprowadzona w toku badań analiza kodu źródłowego modułu **CPUfreq** pozwoliła na opracowanie matematycznego modelu sterownika kompatybilnego z

```
1# cat cpu0/CPUfreq/scaling_available_governors
    conservative userspace powersave ondemand performance
2# cat cpu0/CPUfreq/scaling_available_frequencies
    2401000 2400000 2000000 1600000 1200000 800000
3# cat cpu0/CPUfreq/scaling_driver
    acpi-CPUfreq
4# cat cpu0/CPUfreq/scaling_governor
    ondemand
```

Rys. 3. Konfiguracja modułu **CPUfreq**



Rys. 4. Badana pętla sterowania w module CPUfreq jądra systemu operacyjnego Linux.

architekturą modułu. Model ten posłużył następnie do sformułowania zadania sterowania optymalnego (stochastycznego), którego rozwiązanie określiło postać efektywnej, pod względem jakościowym (QoS) i energetycznym, reguły przełączania szybkości pracy CPU. Identyfikacja własności rozwiązań sformułowanego problemu sterowania optymalnego umożliwiła w rezultacie dokonanie oceny efektywności istniejących mechanizmów sterowania zaimplementowanych w module CPUfreq, a następnie zaprojektowanie mechanizmów konkurencyjnych.

W wyniku przeprowadzonych prac badawczo-rozwojowych stworzone zostały prototypy dwóch sterowników przeznaczonych do implementacji w module CPUfreq jądra systemu Linux:

- ECONET-Q,
- ECONET-E.

Mechanizmy zaimplementowane w obu sterownikach obniżają koszty energetyczne obsługi zleceń (instrukcji) mając jednocześnie na względzie zachowanie właściwego zapasu mocy obliczeniowej. Oznacza to, że oszczędzają energię tylko wtedy, gdy jest to dopuszczalne z punktu widzenia zadanych parametrów jakości usług (QoS) świadczonych przez system operacyjny. Dzięki efektywnemu wykorzystaniu zidentyfikowanej charakterystyki pracy procesora obsługującego system operacyjny stanowią one rozwiązanie konkurencyjne względem sterownika ONDEMAND, podstawowego i wydajnego mechanizmu wykorzystywanego w jądrze systemu Linux. Przeprowadzone wstępne badania symulacyjne sugerują, że opracowane w ramach projektu ECONET sterowniki mogą przewyższać sterownik

ONDEMAND efektywnością obsługi zleceń (QoS) przy porównywalnym koszcie zużycia energii elektrycznej. Sterownik ECONET-Q wykorzystuje energooszczędną strategię sterowania agresywnie dążącą do utrzymania parametrów jakości obsługi zleceń. Sterownik ECONET-E wykorzystuje strategię równoważącą koszty energetyczne i jakościowe obsługi zleceń – por. rys. 5.

Zespół NASK/PW prowadzi obecnie prace nad optymalizacją implementacji opracowanych reguł sterowania w jądrze systemu operacyjnego Linux.

4. ENERGOOSZCZĘDNE ALGORYTMY TRASOWANIA RUCHU (WARSTWA NCP)

Warstwa NCP wspomaga decyzje administratora sieci związane z planowaniem aktywności routerów oraz interfejsów sieciowych, umożliwiając ich bezpieczne uspianie w okresach niskiego natężenia ruchu sieciowego lub przestawianie w tryb pracy charakteryzujący się zmniejszeniem zużycia energii. Stosowana jest zarówno technologia szybkiej hibernacji oraz skalowania częstotliwości i napięcia procesora. NCP wyznacza decyzje globalnie dla całej sieci, na podstawie znanej topologii sieci, aktualnego jej obciążenia oraz prognozowanych wielkości minimalnych zapotrzebowań na przepływność zgłaszana przez routery brzegowe sieci w Mb/s.

Projektując mechanizmy NCP założono, że sieć jest zbudowana z nowoczesnych energooszczędnych urządzeń, które mogą pracować w różnych stanach charakteryzujących się różnym zużyciem energii, której odpowiada różna maksymalna przepustowość [8]. Wynikiem

STEROWNIK	WYDAJNOŚĆ	RÓWNOWAGA	OSZCZĘDNOŚĆ
ECONET-Q	✓		
ECONET-E		✓	
ONDEMAND			✓

Rys. 5. Sterowniki CPU na tle preferencji administratora systemu.

prac badawczych prowadzonych przez zespół NASK/PW są dwa warianty realizacji sterowania. W obu zakłada się wprowadzenie pewnej jednostki centralnej, która oblicza dla całej sieci optymalne z punktu widzenia oszczędności energii trasowanie ruchu w sieci (uwzględniając oczywiście wymagania QoS) oraz stany energetyczne urządzeń sieciowych. 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 oraz porty.

W pierwszym wariantcie (cNCP) zakłada scentralizowane sterowanie urządzeniami tworzącymi sieć. Decyzje wyznaczane przez warstwę cNCP obejmują zarówno stany energetyczne, w których powinny pracować urządzenia sieciowe (routery, karty i porty) oraz tablice routingu uwzględniające te stany. Tablice routingu są przekazywane do warstwy OAM, a zalecane stany energetyczne do warstw LCP zlokalizowanych na urządzeniach.

Drugi wariant sterowania NCP – sterowanie hierarchiczne (hNCP) zakłada, że mechanizm decyzyjny przekazuje do systemu jedynie informację o obliczonym energooszczędnym routingu. Stany energetyczne urządzeń są wyznaczane lokalnie przez mechanizm LCP zaimplementowany na urządzeniu i opisany w rozdziale 3.

W ramach prowadzonych badań analizowano różne algorytmy do wyznaczania optymalnej konfiguracji energetycznej urządzeń tworzących sieć. Sformułowano zadania optymalizacji w wersji ciągłej i dyskretnej [7]. Prace rozpoczęto od zadania wyznaczania pełnego routingu, przy założeniu dyskretnych zmiennych decyzyjnych [8]. Może być rozwiązane przy wykorzystaniu klasycznych metod podziału i ograniczeń. Niestety, jest to sformułowanie NP-zupełne. Ogromne kłopoty pojawiają się w przypadku zastosowania tego typu podejścia do dużych sieci. Zaproponowano różne uproszczenia sformułowania zadania. Wyniki analiz rozważanych rozwiązań zawarto w pracy [9]. Ostatecznie zdecydowano się na uproszczenie zadania i zastosowanie algorytmów wykorzystujących heurystyki. Zaproponowano transformację zadania dyskretnego wyznaczania pełnego routingu do przestrzeni zmiennych ciągłych i zastosowanie klasycznych solverów liniowych optymalizacji. Sformułowanie zadania oraz opracowany algorytm heurystyczny są opisane poniżej.

Rozważmy sieć zbudowaną z $r = 1, \dots, R$ routerów, $c = 1, \dots, C$ kart i $p = 1, \dots, P$ portów. Załóżmy, że urządzenia mogą pracować w różnych stanach energetycznych ($k=1, \dots, K$): routery i karty sieciowe w dwóch stanach (aktywny i uśpiony), porty, a tym samym połączenia między portami, w kilku stanach związanych z różną prędkością transmisji danych.

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

$$\min_{x,y,z,u} \left\{ \sum_e \sum_k \zeta_{ek} y_{ek} + \sum_c W_c x_c + \sum_r T_r z_r \right\} \quad (1)$$

$$\forall_{e=1, \dots, E} \quad y_{e1} \geq \dots \geq y_{ei} \geq \dots \geq y_{eK} \quad (2)$$

$$\forall_{e=1, \dots, E, k=1, \dots, K, c=1, \dots, C} \quad \sum_p l_{cp} a_{ep} y_{ek} \leq x_c, \quad (3)$$

$$\forall_{e=1, \dots, E, k=1, \dots, K, c=1, \dots, C} \quad \sum_p l_{cp} b_{ep} y_{ek} \leq x_c, \quad (4)$$

$$\forall_{r=1, \dots, R, c=1, \dots, C} \quad g_{rc} x_c \leq z_r, \quad (5)$$

$$\forall_{d=1, \dots, D, p=s_d} \quad \sum_e a_{ep} u_{ed} - \sum_e b_{ep} u_{ed} = 1, \quad (6)$$

$$\forall_{d=1, \dots, D, p \neq s_d, p \neq t_d} \quad \sum_e a_{ep} u_{ed} - \sum_e b_{ep} u_{ed} = 0, \quad (7)$$

$$\forall_{d=1, \dots, D, p=t_d} \quad \sum_e a_{ep} u_{ed} - \sum_e b_{ep} u_{ed} = -1, \quad (8)$$

$$\forall_{e=1, \dots, E} \quad \sum_d V_d u_{ed} \leq \sum_k M_{ek} y_{ek}. \quad (9)$$

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. $M_{ek} = load_e(k) - load_e(k-1)$ oznacza pojemność łącza e w stanie energetycznym k a $\zeta_{ek} = pow_e(k) - pow_e(k-1)$ koszt energetyczny łącza e w stanie energetycznym k .

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.

Do rozwiązania zadania optymalizacji (1)–(9) proponuje się następujący algorytm:

Algorytm

krok 0: Start. Niech POpt oznacza problem optymalizacji (1)–(9)

krok 1: Rozwiąż problem POpt i oblicz optymalne wartości zmiennych: $\hat{z}_r, \hat{x}_c, \hat{u}_{ed}, \hat{y}_{ek}$.

krok 2: Sprawdź wyniki obliczeń z **kroku 1**. Jeśli wszystkie zmienne $\hat{z}_r, \hat{x}_c, \hat{u}_{ed}, \hat{y}_{ek}$ mają wartości binarne – STOP.

W przeciwnym przypadku:

- i. jeśli zostało wybrane łącze, dla którego $\hat{y}_{ek} \in (0,1)$ wówczas utwórz podzbiór $S_E^* \subset S_E$ zawierający wszystkie takie łącza wykonaj **krok 3**, w przeciwnym przypadku:
- ii. jeśli zostało wybrane łącze, dla którego $\hat{u}_{ed} \in (0,1)$ wówczas utwórz podzbiór $S_E^{**} \subset S_E$ zawierający wszystkie takie łącza wykonaj **krok 4**.

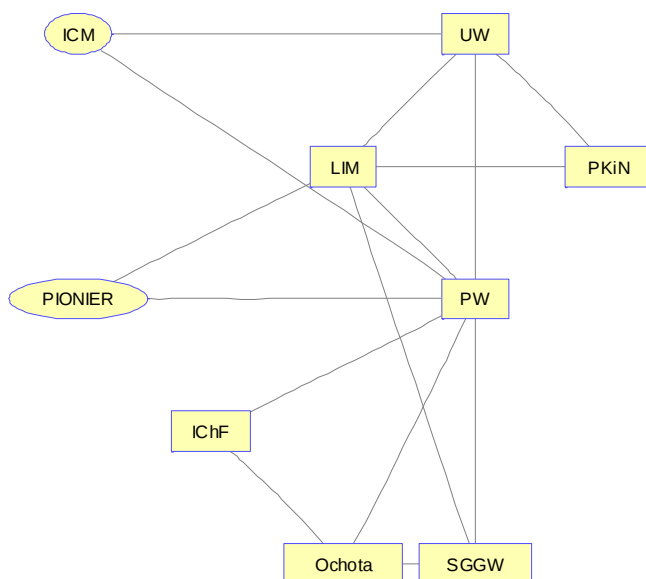
krok 3: Utwórz podzbiór $S_{E_{min}} \subset S_E^*$ złożony z łączy działających w najniższym stanie energetycznym k^* . Wybierz ze zbioru $S_{E_{min}}$ łączy e^* dla którego y_{ek} przyjmuje najmniejszą wartość. Usuń $\hat{y}_{e^*k^*}$ ze zbioru S_E^* . Sformułuj rozszerzony problem optymalizacji POptE – dodaj do problemu POpt nowe ograniczenie $y_{e^*k^*} = 1$. Podstaw POpt = POptE i wróć do **kroku 1**.

krok 4: Wybierz ze zbioru S_E^{**} łączy e^{**} dla którego $\hat{u}_{ed}$ przyjmuje najmniejszą wartość. Usuń $\hat{u}_{e^{**}d}$ ze zbioru S_E^{**} . Sformułuj rozszerzony problem optymalizacji POptE – dodaj do problemu POpt nowe ograniczenie $u_{e^{**}d} = 1$. Podstaw POpt = POptE i wróć do **kroku 1**.

Obecnie prowadzone są eksperymenty symulacyjne algorytmu dla różnych topologii sieci. Dotychczasowe wyniki prezentowane w pracy [10] są bardzo zachęcające. Algorytm w akceptowalnym czasie pozwala na wyznaczenie optymalnej konfiguracji energetycznej urządzeń dla sieci o średnich rozmiarach i dużej liczbie prognozowanych zapotrzebowań. Czas wykonania obliczeń jest znacznie krótszy niż w przypadku rozwiązywania pełnego zadania dyskretnego, a wyznaczone rozwiązania bardzo podobne. Jednocześnie trwają również prace nad przygotowywaniem implementacji w sieci testowej opisanej w następnym rozdziale.

5. STANOWISKA TESTOWE

W projekcie zaplanowano uruchomienie trzech stanowisk testowych: głównego w Turynie oraz dwóch pomocniczych – w Warszawie (NASK) i Atenach (GRNET). Stanowisko główne służy do testów integracyjnych i wydajnościowych dla ogółu sprzętu i opro-



gramowania wytworzonego przez wszystkich uczestników projektu. Stanowisko to pełni również rolę demonstracyjną, ukazując współdziałanie w praktyce poszczególnych elementów projektu. Kluczową dla procesu integracji technologii jest tutaj GAL – warstwa abstrakcji dla energooszczędnego sprzętu. Niebagatelne znaczenie ma również metodyka pomiaru energii oraz sposób generacji ruchu sieciowego. Do pomiaru faktycznie zużytej energii posłużą mierniki wykonane przez firmę Netvisor – uczestnika projektu; natomiast do generacji ruchu – profesjonalne, wysokowydajne, testery.

Lokalne stanowisko testowe przygotowywane w NASK ma również służyć integracji technologii, w tym przypadku integracji energooszczędnych algorytmów. Z tego względu nie jest kluczowe posiadanie w nim technologii sprzętowych wytworzonych w projekcie. Przyjęto zatem, że funkcje routerów pełnić będą wieloportowe komputery klasy PC z systemem operacyjnym Linux. Natomiast niezwykle istotne pozostają: przyjęta topologia sieci oraz dokładny pomiar mocy. W stanowisku testowym przyjęto topologię sieci zbliżoną do sieci WARMAN – aby móc zweryfikować ewentualny scenariusz wdrożenia rozpatrywanych technologii w sieci roboczej NASK. Opomiarowanie zużycia energii zostało zrealizowane za pomocą powszechnie używanych liczników LAP firmy Pozyton – por. rys. 6.

6. PODSUMOWANIE

Artykuł prezentuje główne koncepcje i wyniki badań prowadzonych przez zespół NASK/PW w projekcie ECONET. Prace koncentrowały się na strukturach i algorytmach sterowania dla energooszczędnych sieci teleinformatycznych. Zaproponowano mechanizmy wspierające decyzje administratora związane z planowaniem aktywności urządzeń sieciowych w celu zmniejszenia zużycia energii. Opracowano algorytm trasowania ruchu uwzględniający możliwość pracy urządzeń w różnych stanach charakteryzujących się różnym zużyciem energii. Zaproponowane zostały również prototypowe mechanizmy sterowania efektywnie równoważące



Rys. 6. Struktura stanowiska testowego NASK oraz licznik używany do pomiarów (wg. <http://www.pozyton.com.pl/img/lap.png>)

koszty energetyczne i jakościowe skalowania szybkości CPU w systemie operacyjnym Linux. Należy podkreślić, że istniejące mechanizmy sterowania szybkością CPU, udostępniane przez moduł **CPUFreq** w systemie Linux, przyczyniają się do redukcji zużycia energii przez system operacyjny. Przeprowadzone w ramach projektu ECONET badania pokazują, że efektywność tych mechanizmów można poprawić, przy czym pole do kompromisu pomiędzy jakością usług a oszczędnością w zużyciu energii jest niewielkie. Nieznaczny wzrost poboru mocy CPU może skutkować znacznym wzrostem jakości usług (QoS), ale również odwrotnie, niewielka i nieumiejętna redukcja poboru mocy może prowadzić do drastycznej degradacji jakości usług. Wynikiem podsumowującym prace realizowane w ramach projektu będzie demonstrator – prototypowa energooszczędna sieć IP implementująca rozwiązania przedstawione w tym artykule.

SPIS LITERATURY

- [1] D. Weller, B. Woodcock. *Internet Traffic Exchange: Market Developments and Policy Challenges*. OECD Digital Economy Papers 207, OECD Publishing, Jan. 2013
- [2] E. Labouze, C. Iyama, A. Beton, L. Stobbe, S. Gallehr, L. Scheidt. *Impacts of information and communication technologies on energy efficiency*. European Commission, Bruksela, 2008.
- [3] Strona www: <http://econet-project.eu>
- [4] M. Kamola, P. Arabas, P. Jaskóła, T. Wiśniewski, E. Niewiadomska-Szynkiewicz, K. Malinowski, M. Karpowicz, A. Sikora, M. Marks, M. Mincer, K. Daniluk, *Econet – energooszczędne technologie dla przewodowych sieci komputerowych*, Przegląd Telekomunikacyjny i Wiadomości Telekomunikacyjne, str. 650-655, nr 8-9, 2012
- [5] R. Bolla, R. Bruschi, F. Davoli, F. Cucchietti. *Energy efficiency in the future internet: a survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures*. Communications Surveys & Tutorials, IEEE, (99):1-22, 2010.
- [6] ACPI Specification Document. www.acpi.info.
- [7] P. Arabas, K. Malinowski, A. Sikora, *On formulation of a network energy saving optimization problem*, The Fourth International Conference on Communications and Electronics ICCE 2012, Hue, Vietnam
- [8] E. Niewiadomska-Szynkiewicz, A. Sikora, P. Arabas, J. Kołodziej, *Control Framework For High Performance Energy Aware Backbone Network*, Proc. of 26th European Conference on Modeling and Simulation (ECMS), Koblencja, 2012.
- [9] E. Niewiadomska-Szynkiewicz., A. Sikora, P. Arabas, J. Kołodziej., *Control system for reducing energy consumption in backbone computer network*, Concurrency and Computation: Practice and Experience, DOI: 10.1002/cpe.2964, 2013.
- [10] E. Niewiadomska-Szynkiewicz, A. Sikora, M. Mincer, P. Arabas, *Simulation of Energy-Aware Backbone Networks*, Proc. of 27th European Conference on Modeling and Simulation (ECMS), Aalesund, Norwegia, 2013.