



Marcin CHRZAN, Paweł PIROSZ, Tomasz MAREK

ROZWIĄZANIA WPLYWAJĄCE NA ZMNIEJSZENIE POBORU ENERGII ELEKTRYCZNEJ W SIECIACH KOMPUTEROWYCH

Streszczenie

W artykule omówiona została problematyka zużycia energii elektrycznej urządzeń transmisji danych. Omówiono w nim typowe rozwiązania mające na celu zmniejszenie poboru energii przy zachowaniu funkcjonalności dotychczasowych rozwiązań. Artykuł ten jest wstępem do dalszych rozważań nad możliwością wykorzystania standardów łączności przewodowej i bezprzewodowej w kolejowych systemach teleinformatycznych i sterowania ruchem kolejowym.

WSTĘP

Technologia informacyjno-telekomunikacyjna stała się wszechobecna w naszym życiu, dlatego też nastąpił ogromny nacisk na obniżenie zużycia energii przez urządzenia działające w sektorze IT. Należy jednocześnie przypomnieć, że sektor ten dynamicznie rozwija się również w branży kolejowej. Proponowane programy w celu zmniejszenia zużycia energii początkowo koncentrowały się na komputerach i urządzeniach konsumenckich. Jednak szacuje się, że urządzenia sieciowe i interfejsy sieciowe stanowią więcej niż 10% całkowitego zużycia energii IT: dziesiątki TWh rocznie [1].

Ethernet jest najpopularniejszym standardem rozpowszechnionym w sieciach lokalnych na świecie jak również znajduje zastosowanie w technice sterowania ruchem kolejowym. Przykładem zastosowania są produkty wiodącego producenta systemów srk w Polsce firmy Kombud.. Praktycznie cały ruch sieciowy przechodzi przez różnorodne łącza Ethernet. Jednak większość urządzeń i łączy Ethernet spędza dużo czasu w bezczynności, czekając na pakiety danych. W procesie bezczynności zużycie energii przez urządzenia i interfejsy jest na stałym poziomie. Logiczne zatem staje się pytanie jak można zmniejszyć zużycie energii w tym czasie, przez urządzenia sieciowe bez niekorzystnego wpływu na transmisje danych.

W ostatnich latach, szybko wzrosła komunikacja bezprzewodowa, wzrost ten jest szczególnie widoczny w sferze komputerów osobistych i biznesowych jak i urządzeń mobilnych. Pomimo swojej rosnącej popularności, Wi-Fi nadal prezentuje kilka problemów. Jednym z najważniejszych jest to, że zużycie energii w sieciach bezprzewodowych 802.11 ciągle wzrasta. Jak pokazują badania [2] w przypadku bezprzewodowych kart sieciowych WLAN (Wireless Local Area Networks) zapotrzebowania na energię okazuje się bardzo duże. Karta pracująca z szybkością 1Mbit/s, pobiera dwunastokrotnie więcej energii niż

standardowa karta Ethernet, pracująca z szybkością 10 Mbit/s, dotyczy to zarówno trybu nadawania jak i odbioru [2,3].

1. MECHANIZM OSZCZĘDZANIA ENERGII W SIECIACH ETHERNET - STANDARD IEEE 802.3AZ

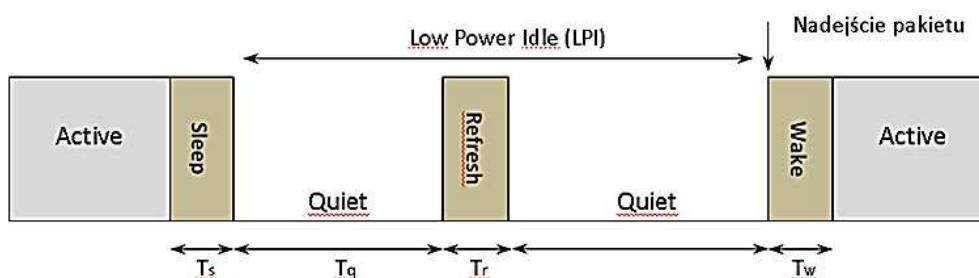
Zużycie energii w sieciach komputerowych to temat rosnącego zainteresowania dla społeczności IT. Jednym z przykładów jest energooszczędny Ethernet standard IEEE 802.3az, który przewiduje oszczędności energii powyżej 4 TWh rocznie [4]. Standard Energy Efficient Ethernet (EEE) [5] określa metody zmniejszenia zużycia energii w urządzeniach Ethernet poprzez określenie niskich trybów zasilania. Chodzi o to, że nadajnik, który nie posiada w danym czasie ramki do transmisji można wprowadzić w tryb niskiego zasilania. Kiedy pojawia się nowa ramka do wysłania nadajnik powraca bardzo szybko (kilka mikrosekund) do aktywnego trybu. Pozwala to na oszczędności energii, które są prawie niewidoczne dla górnych warstw protokołów [6].

Aby zmniejszyć zużycie energii, jeśli nadajnik nie ma żadnych danych do przesyłania, standard IEEE 802.3az wprowadza pojęcie sygnału Low Power Idle (LPI), który jest używany zamiast sygnału ciągłego IDLE [5]. Główną ideą LPI jest to, że łącza komunikacyjne powinny zużywać energię tylko wtedy gdy następuje transmisja danych w innym przypadku urządzenie sieciowe powinno przejść w stan uśpienia. Aby zaoszczędzić energię, w czasie, gdy istnieje luka w strumieniu danych, używany jest protokół, który pozwala nadajnikowi przejść w stan bezczynności.

Standard EEE opisuje pięć trybów pracy:

- Active - służy do przekazywania danych przez łącza,
- Sleep - przejście w tryb bezczynności LPI – T_s ,
- Quiet - praca w trybie LPI – T_q
- Wake - przejście w tryb aktywny z LPI - T_w ,
- Refresh – odświeżanie – T_r .

Działanie trybu LPI przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Tryb przejścia w oszczędność energii (EEE) [5]

Zużycie energii przez urządzenia warstwy fizycznej (PHY) w momencie, gdy znajdują się one w trybie LPI jest znacznie niższe, niż w normalnym trybie pracy. Zostało to potwierdzone przy testowaniu kart sieciowych. W tabeli 1 przedstawiono wyniki pomiarów zużycia energii w mW przez karty sieciowe dwóch najczęściej wykorzystywanych obecnie standardów, z włączonym i wyłączonym EEE. Jak wynika z badań [7], zużycie energii kart sieciowych wykorzystujących EEE spadło o 70% dla standardu 1 Gb/s oraz o około 30% dla standardu 100 MB/s.

Tab.1 Zużycie energii przez karty sieciowe [7]

| Protokół | Brak ruchu | | Pełne obciążenie | |
|------------|------------|-----|------------------|-----|
| | Podstawowy | EEE | Podstawowy | EEE |
| 100BASE-TX | 208 | 139 | 215 | 208 |
| 1000BASE-T | 525 | 152 | 541 | 535 |

Źródło: P. Reviriego, K., Christensen, J. Rabanillo, J.A. Maestro, *An Initial Evaluation of Energy Efficient Ethernet*, IEEE Communications Letters, Vol. 15, No 5, May 2011, pp. 578-580.

Rzeczywista oszczędność energii zależy od ilości czasu w jakim urządzenie spędza w trybie LPI. Czas ten może być różny w zależności od przejścia ze stanu uśpienia (T_s) w stan aktywny. Podczas tych przejść, istnieje znaczne zużycie energii, a czasy przejścia są duże w stosunku do czasu transmisji ramki [7,8]. W tabeli 2 przedstawiono wyniki pomiarów [8] efektywności energetycznej zdefiniowanej jako stosunek czasu trwania ramki T_f do sumy czasów budzenia, uśpienia i trwania ramki $T_f/(T_w+T_s+T_f)$.

Tab.2 Minimalny czas budzenia, uśpienia i transmisji pojedynczej ramki oraz wydajności dla różnych szybkości transmisji[8]

| Protokół | Min T_w (μ sec) | Min T_s (μ sec) | Wielkość ramki (bajty) | Min T_f (μ sec) | Efektywność pojedynczej ramki |
|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|
| 100BASE-TX | 30,5 | 200 | 1518 | 120 | 34,2% |
| | | | 64 | 5,1 | 2,2% |
| 1000BASE-T | 16,5 | 182 | 1518 | 12 | 5,7% |
| | | | 64 | 0,5 | 0,3% |

Źródło: Reviriego, P., Sivaraman V., Zhao, Maestro Z., Vishwanath J.A., Sanchez-Macian A., Russell A., *An energy consumption model for Energy Efficient Ethernet switches*, High Performance Computing and Simulation, 2012 International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/HPCSim.2012.6266897 2012 , Page(s): 98 - 104

Jak wykazują badania krótki czas trwania ramki powoduje, że efektywność tej ramki znacznie spada. Chcąc poprawić efektywność należy zwiększyć wielkość ramki a zarazem czas jej trwania. Można to osiągnąć łącząc ramki w większe pakiety przesyłanych danych, co wykazano w [8].

Standard Energy Efficient Ethernet (EEE) [2] definiuje sposób przejścia w stan niskiego poboru energii (LPI) jednak nie definiuje określonych chwil czasowych zmiany trybu pracy. Każdy system musi korzystać z własnej polityki definiowania o przejściu w stan uśpienia i wybudzania się. Przykładami takich strategii [9] mogą być:

- Najprostszy algorytm (Simplest algorithm) – kiedy bufor transmisji jest pusty urządzenie po określonym czasie przechodzi w tryb LPI, kiedy nadejdzie pakiet do wysłania, urządzenie ponownie się uaktywnia.
- Algorytm szeregowania (Buffer-and-burst) – kiedy bufor transmisji jest pusty, urządzenie przechodzi w tryb LPI; kiedy nadejdzie pakiet urządzenie czeka na większą porcję danych a następnie ponownie włącza połączenie i wysyła serię danych.
- Synchroniczny algorytm szeregowania (Synchronized burst) – dezaktywacja i ponowna aktywacja połączenia następuje według zegara w taki sposób, że system jest zoptymalizowany w celu zmniejszenia przepustowości lub unika wielu aktywnych interfejsów jednocześnie.
- Bezpieczeństwo aplikacji sieciowej (Application aware policy) – monitorowanie warstwy transportowej i warstw wyższych w celu dezaktywowania połączenia lub zbadania ilości nadchodzących pakietów.

Biorąc pod uwagę nowość standardu EEE można spodziewać się rozwoju większej ilości zasad (polityk) w zależności od różnych wymagań systemowych. Ważne jest, aby urządzenia

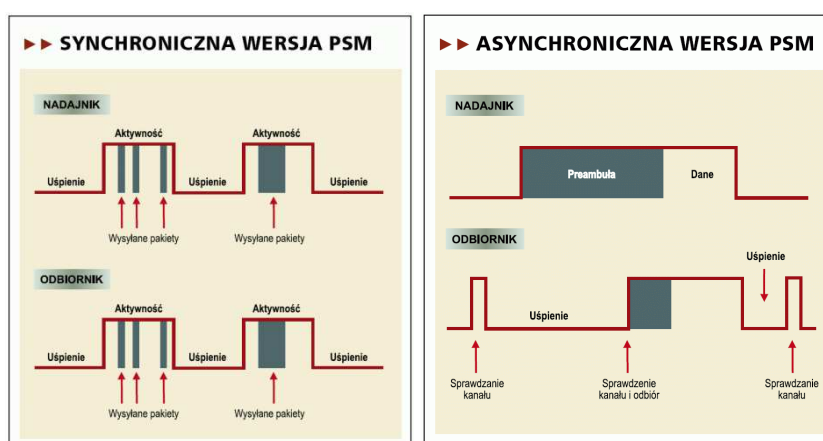
które obsługują EEE mogły komunikować się w ramach swojej polityki systemu sieciowego zarządzania energią w sposób optymalny w ramach całej sieci.

2. MECHANIZMY OSZCZĘDZANIA ENERGII W SIECIACH WIFI

Funkcje zarządzania energią zostały już wprowadzone w pierwszej wersji standardu IEEE 802.11 w 1997 roku. Jednakże pojawiają się kolejne technologie umożliwiające wydłużenie czasu pracy urządzeń bezprzewodowych. Różnice pomiędzy nimi sprowadzają się do sposobu, w jaki nieaktywna karta sieciowa może zostać wybudzona i w jaki sposób negocjowane jest połączenie.

Obecnie najczęściej wykorzystywane technologie ochrony energii w urządzeniach WLAN to [10]:

- Constantly Awake Mode (CAM) - najbardziej powszechnie stosowany sposób oszczędzania energii w WiFi. CAM występuje zwykle jako domyślna opcja w większości obecnie oferowanych produktów. Działanie tej metody opiera się na przekazaniu do punktu dostępowego informacji od odbiornika Wi-Fi, że przechodzi on na określony czas w tryb aktywności i wtedy możliwy staje się odbiór danych z punktu dostępowego.
- Power Save Mode (PSM) - metoda zdefiniowana w standardzie 802.11. Metoda polega na okresowym przechodzeniu klienta bezprzewodowego w stan uśpienia, na określony czas. W zdefiniowanych przedziałach czasowych odbiornik „wybudza się“ w celu sprawdzenia, czy infrastruktura zakolejkowała ruch przeznaczony dla niego i odebrać dane. PSM może pracować w dwóch trybach pracy: synchronicznym i asynchronicznym (rys.2). W trybie synchronicznym punkt dostępowy pracuje jako bufor dla pakietów przeznaczonych dla odbiornika Wi-Fi, gdyż w stanie "uśpienia", nie ma możliwości przesłania do niego danych. Aby wybudzanie było zgodne z pracą punktu dostępowego, z którego będą wysyłane informacje do odbiornika, konieczna jest synchronizacja zegarów obu urządzeń. Synchronizację oraz negocjację interwału pracy reguluje wymiana specjalnych ramek pomiędzy punktem dostępowym a odbiornikiem. W trybie asynchronicznym odbiornik przechodzi w tryb oszczędny w dowolnym momencie, nie zaś w wyznaczonym precyzyjnie czasie. W przypadku wysyłania danych odbiornik powiadamia punkt dostępowy i w momencie ich wysyłania pracuje z pełną mocą. Technika ta bardziej sprawdza się dla ruchu wrażliwego na opóźnienia, takiego jak głos. Podobne techniki ochrony energii uwzględnia specyfikacja 802.11n.



Rys. 2. Synchroniczna i asynchroniczna wersja PSM [11]

- Unscheduled Automatic Power Save Delivery (U-APSD) – technologia asynchroniczna, która umożliwia wymuszenie transmisji danych na żądanie klienta w zmiennych

interwałach czasu. Po zakończeniu nadawania punkt dostępowy przesyła specjalną ramkę sygnalizacyjną oznaczającą koniec transmisji, a odbiornik przechodzi w stan uśpienia.

- Wireless Multimedia Power Save (WMM-PS) – rozszerzenie techniki U-APSD, polegające m.in. na wydłużeniu czasu, w którym terminal może pozostawać uśpiony oraz zmniejszeniu liczby pakietów kontrolnych i narzutu transmisji danych. Wprowadzona wraz z rozwojem standardu IEEE 802.11e.
- Power Save Multi-Poll (PSMP) – technika, w której punkt dostępowy przesyła do urządzenia sieciowego informację, jak długo może ono pozostawać w uśpieniu, moment rozpoczęcia transmisji przeznaczonych dla niego danych przychodzących oraz moment rozpoczęcia nadawania. Opracowana dla używającej wielu obwodów radiowych technologii MIMO (Multiple Input, Multiple Output), określona w specyfikacji 802.11n.
- Dynamic MIMO Power Save (DMPS) – technika wykorzystywana w niektórych urządzeniach wielokanałowych MIMO umożliwiającą automatyczne dostosowywanie liczby aktywnych kanałów transmisji w zależności od obciążenia ruchu sieci bezprzewodowej.
- Wake on Wireless – technika pozwalająca na zdalne wybudzenie bezprzewodowego urządzenia sieciowego, stanowiąca odpowiednik znanej z przewodowych urządzeń sieciowych funkcji Wake on LAN.

3. E-MILI (ENERGY MINIMIZING IDLE LISTENING) – MINIMALIZACJA ENERGII PRZY BEZCZYNNYM NASŁUCHIWANIU

Interfejs WIFI jest głównym konsumentem energii w urządzeniach przenośnych takich jak: tablety, smartfony czy netbooki. Największe zużycie energii występuje przy bezczynnym nasłuchiwanie. Większość protokołów, takich jak PSM w standardzie 802.11, próbuje zredukować energię elektryczną poprzez ustalone harmonogramem przejście w stan uśpienia. Jednakże, poprzez liczne analizy ruchu sieciowego w rzeczywistym świecie okazało się, że więcej niż 60% energii jest zużywane nie na potrzeby nadawania i odbioru danych, lecz na nasłuchiwanie i uśpienie, nawet przy włączonym trybie PSM, z czego 87% energii jest zużywane w czasie bezczynności (Idle listening – IL), a niewielki procent oszczędzany jest w trybie uśpienia [12].

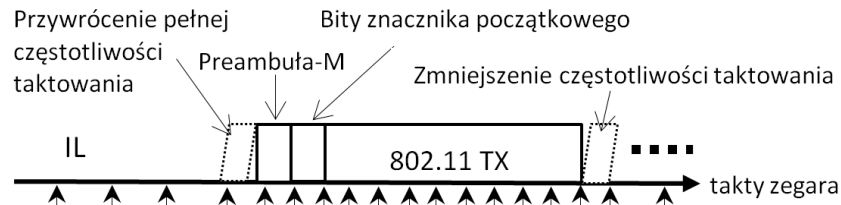
Rozwiązaniem problemu zużycia energii w czasie gdy urządzenie znajduje się w trybie bezczynności może okazać się zmniejszenie częstotliwości taktowania urządzeń sieciowych w stanie IL. Koncepcje takiego rozwiązania, nazwanego E-Mili (Energy-Minimizing idle Listening) przedstawiono w [12]. Celem tej koncepcji jest minimalizacja energii w czasie bezczynnego nasłuchiwania.

E-Mili jest metodą pozwalającą na obniżenie częstotliwości taktowania chipu odpowiedzialnego za łączność Wi-Fi (do 1/16 standardowego taktowania) i „rozpędzanie“ go do pełnej prędkości jedynie, gdy zaczynają napływać dane. E-Mili zakłada zmniejszenie mocy IL poprzez spowolnienie zegara, który taktuje układy cyfrowe w radiowych urządzeniach sieciowych. Nowoczesne układy cyfrowe zużywają energię (P) podczas przełączania poziomów logicznych, a jej zużycie jest zależne od napięcia zasilania (V) i częstotliwości taktowania (f) [13, 14]:

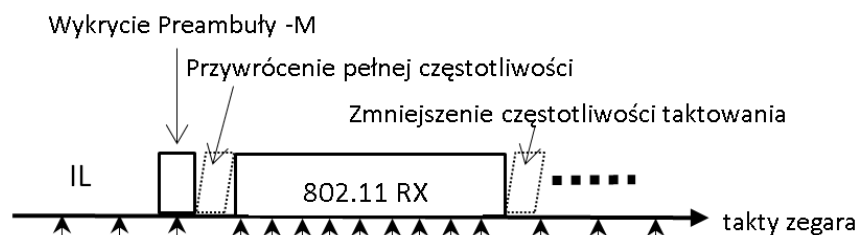
$$P \propto V^2 f \quad (1)$$

Stąd liniowe zmniejszenie poboru mocy można osiągnąć przez zmniejszenie szybkości taktowania zegara. Jak wykazano w [12] zmniejszenie częstotliwości taktowania do połowy wartości nominalnej w układach Atheros daje redukcję zużycia mocy o 31,4%. W-Mili

kontroluje stan zegara interfejsu radiowego w celu zmniejszenia poboru mocy w stanie IL. Zmniejsza się więc częstotliwość zegara podczas IL, a następnie zwiększa do pełnej szybkości przed nadawaniem/odbieraniem pakietu. Rysunek 3 i 4 przedstawia koncepcję transmisji nadawania i odbierania pakietów z wykorzystaniem E-Mili.



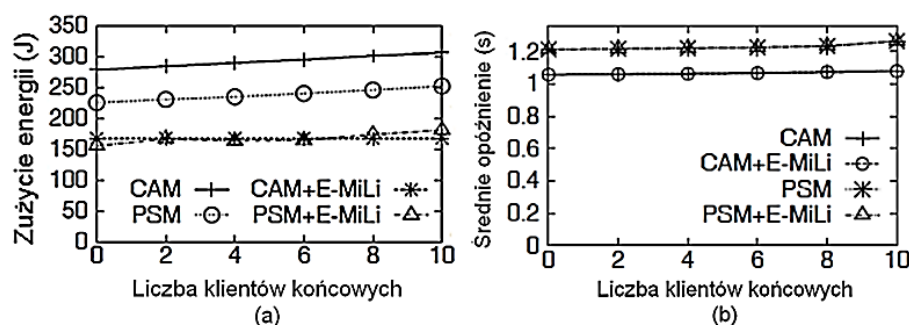
Rys. 3. Nadawanie pakietów z wykorzystaniem E-Mili [12]



Rys. 4. Nadawanie pakietów z wykorzystaniem E-Mili [12]

E-Mili wysyła przed każdym transmitowanym pakietem w 802.11 dodatkowy pakiet zwany preambułą-M. W czasie bezczynności IL odbiornik pracujący ze zmniejszoną częstotliwością stale kontroluje kanał i oczekuje na preambułę-M, używając algorytmu SRID (sampling rate invariant detection algorithm). W momencie wykrycia preambuły-M odbiornik natychmiast przełącza się na pracę z pełną szybkością i oczekuje od nadajnika standardu 802.11 nadawania pakietu. Odbiornik wykorzystuje ukryty mechanizm adresowania warstwy fizycznej (PHY) do filtrowania preambuł-M przeznaczonych dla innych węzłów sieci, a tym samym zapobiega niepotrzebnemu zwiększeniu częstotliwości zegara. Operacje nadawania są realizowane zgodnie z MAC 802.11, z wyjątkiem wykrywania nośnej, którą to operację realizuje SRID. Jeżeli urządzenia radiowe pracują ze zmniejszoną częstotliwością podczas wykrywania nośnej, muszą przywrócić pełną częstotliwość pracy przed transmisją danych. Dokładny czas powrotu do pracy z pełną częstotliwością jest planowany przez kolejny element E-Mili zwany Opportunistic Downclocking (ODoc). Po dokonaniu operacji nadawania lub odbierania danych urządzenia mogą natychmiast przejść w tryb zmniejszonej częstotliwości taktowania i oszczędzania energii.

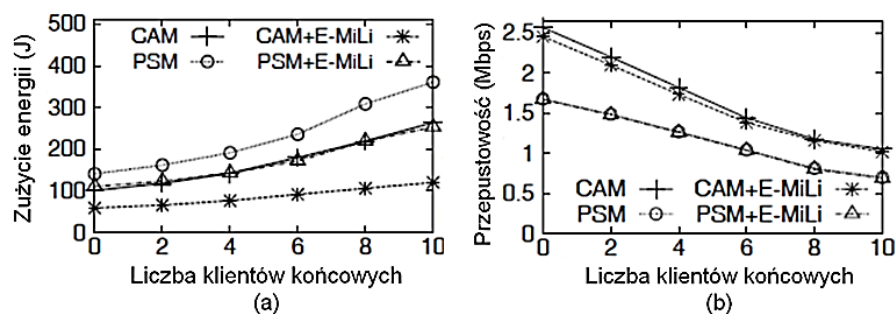
Na rysunku 5 przedstawiono wyniki pomiarów zużycia energii uzyskanych podczas 5-minutowej sesji WWW w zależności od liczby klientów końcowych



Rys.5. Wydajność 5-minutowej sesji przeglądania stron WWW [12]

Przesyłanie danych z użyciem PSM pozwala na oszczędność energii o 18% w stosunku do trybu CAM. Połączenie trybu CAM z E-MiLi pozwala na oszczędność energii o 39,8% w stosunku do trybu CAM, zaś w przypadku gdy 10 użytkowników przegląda strony WWW oszczędność energii wzrasta do 47,1%.

Na rysunku 5 przedstawiono średnie opóźnienie ładowania stron w zależności od użytkowników końcowych. Jak widać z wykresu najmniejsze opóźnienia daje połączenie trybu CAM z E-MiLi [15].



Rys. 6. Wydajność przy odbieraniu 10 MB pliku przez FTP [12]

Źródło: Zhang, Xinyu, Shin, Kang., *E-MiLi: Energy-Minimizing Idle Listening in Wireless Networks* G. Mobile Computing, IEEE Transactions on Volume: 11, Issue: 9 Digital Object Identifier: 10.1109/TMC.2012.112 2012, s:1441-1454

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki pomiarów zużycia energii elektrycznej przy przesyłaniu 10MB pliku poprzez sesję FTP (a) oraz zmiany przepustowości (b) w funkcji liczby klientów końcowych w zależności od zastosowanego trybu oszczędzania energii.

Podobnie jak przy sesji WWW zastosowanie trybu CAM w połączeniu z E-MiLi pozwala na oszczędność energii na poziomie 36,8% - 39,4% w stosunku do trybu PSM, zaś liczba klientów końcowych wpływa na przepustowość danych, powodując jej zmniejszenie wraz ze wzrostem liczby sesji FTP.

PODSUMOWANIE

Współczesne systemy transmisji bezprzewodowej wymagają ze względu na zasięg dużego poboru energii elektrycznej. Wskazane w artykule rozwiązania umożliwiają zmniejszenie poboru energii co wpływa na emisję cieplną urządzeń przy zachowaniu ich funkcjonalności. Zastosowanie proponowanych rozwiązań ma szczególne znaczenie w przypadku zastosowania ich w kolejowych systemach teleinformatycznych. Planowane wykorzystanie sieci otwartych do sterowania ruchem kolejowym może przyczynić się do wzrostu zapotrzebowania na tego typu urządzenia na kolei. Ich niski pobór energii przy zachowanych parametrach propagacyjnych będzie miał ogromny wpływ na rozwój tej technologii.

THE SOLUTIONS TO REDUCE THE ISSUES AFFECTING OF ENERGY CONSUMPTION IN COMPUTER NETWORKS

Abstract

The article discusses the problem of energy consumption data devices. It discusses typical

solutions to reduce energy consumption while maintaining the functionality of the existing solutions. This article is an introduction to the further consideration of the possibility of using standard wired and wireless communications in the railway telecommunications systems and interlocking.

BIBLIOGRAFIA

1. Roth, Goldstein & Kleinman., 2001, *Energy Consumption by Office and Telecommunications Equipment in Commercial Buildings*, Lanzisera, Nordman, Brown, 2010.
2. Qiao D., Choi S., Soomro A., Shin K.G.: *Energy-Efficient PCF Operation of IEEE 802.11a WLANs via Transmit Power Control*. Taipei, Taiwan, 1999
3. M. Natkaniec., *Analiza mechanizmu zarządzania poborem energii w sieci ad-hoc standardu IEEE 802.1*, Telekomunikacja Cyfrowa/Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; ISSN 1505-9405 - 2006/2007 T.8 s.41–50(wyd. 2009)
4. Christensen, K., Reviriego, P., Nordman, B., Bennett, M., Mostowfi, M., and Maestro, J.A.: *IEEE 802.3az: "The Road to Energy Efficient Ethernet"*, IEEE Communications Magazine, vol. 48 , issue. 11, November 2010, pp: 50 – 56.
5. IEEE P802.3az Energy Efficient Ethernet Standard, September 2010.
6. Reviriego P., Hernández J.A., Larrabeiti D. and Maestro J.A., "*Performance Evaluation of Energy Efficient Ethernet*" IEEE Communication Letters, Vol. 13, No 9, September 2009, pp. 697-699.
7. Reviriego P., Christensen K., Rabanillo J., Maestro J.A., "*An Initial Evaluation of Energy Efficient Ethernet*", IEEE Communications Letters, Vol. 15, No 5, May 2011, pp. 578-580.
8. Reviriego, P., Sivaraman V., Zhao, Maestro Z., Vishwanath J.A., Sanchez-Macian A., Russell A., *An energy consumption model for Energy Efficient Ethernet switches C. High Performance Computing and Simulation*, 2012 International Conference on Digital Object Identifier: 10.1109/HPCSim.2012.6266897 2012 , Page(s): 98 - 104
9. IEEE 802.3az Energy Efficient Ethernet: Build Greener Networks, 17 Dec 2011 www.cisco.com/en/US/prod/collateral/switches/ps5718/white_paper_c11676336.pdf
10. Craig Mathias, *A guide to Wi-Fi power-save technologies*, Techworld, 13 May 2008, <http://features.techworld.com/mobile-wireless/4103/a-guide-to-wi-fi-power-save-technologies/>
11. www.networld.pl/artykuly/349861_3/Zielone.sieci.WiFi.html
12. Zhang, Xinyu; Shin, Kang E-MiLi: *Energy-Minimizing Idle Listening in Wireless Networks G. Mobile Computing*, IEEE Transactions on Volume: 11, Issue: 9 Digital Object Identifier: 10.1109/TMC.2012.112 2012 , s:1441-1454
13. Flautner K., Reinhardt S., and Mudge T., *Automatic Performance Setting for Dynamic Voltage Scaling*, in Proc.of ACM MobiCom, 2001.
14. W. R. Dieter, S. Datta, and W. K. Kai, *Power Reduction by Varying Sampling Rate*, in ACM/IEEE ISLPED, 2005.
15. Tabatabaei A., Onodera K., Zargari M., Samavati H., and Su D., *A Dual Channel sigma-delta(ma być duże greckie) ADC with 40MHz Aggregate Signal Bandwidth*, in Proc. of IEEE ISSCC, 2003.

Autorzy:

dr inż. Marcin Chrzan – UTH Radom

mgr inż. Paweł Pirosz– Zespół Szkół Elektronicznych w Radomiu

mgr Tomasz Marek – Zespół Szkół Elektronicznych w Radomiu