

Dariusz ELJASZ

Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej

Jacek BOJARSKI

Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Matematyki, Informatyki i Ekonometrii

## MODEL M/G/1 PS W PROCESIE MODELOWANIA MECHANIZMU CSMA-CA SIECI STANDARDU IEEE 802.15.4

**Streszczenie.** W artykule zaprezentowano modyfikację klasycznego modelu kolejkowego M/G/1 PS, umożliwiającego analizę bezprzewodowych sieci sensorowych standardu IEEE 802.15.4. Analizie poddano parametr związany z czasem przebywania zadania w systemie, dla którego dodatkowo wyznaczono niepewność pomiaru. Dla nowo utworzonego modelu M/G/1 PS CSMA-CA zbadano wpływ rozmiaru przesyłanych danych oraz liczby węzłów na średni czas przebywania zadania w systemie w zestawieniu z danymi uzyskanymi z symulatora NS-2.

**Słowa kluczowe:** modele kolejkowe, IEEE 802.15.4, M/G/1 PS

## M/G/1 PS QUEUING NETWORKS MODEL IN ANALIZING CSMA-CA MECHANISM IN IEEE 802.15.4 NETWORKS

**Summary.** In the article the M/G/1 PS queuing network system in analysis wireless sensor networks (IEEE 802.15.4) was presented. The mean sojourn time parameters and influence on this parameters number of nodes and size of data was analyzed. The modified M/G/1 PS for wireless sensor networks with CSMA-CA mechanism was shown. A new correction factor  $\kappa$  for M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> was outlined.

**Keywords:** queuing theory, IEEE 802.15.4, CSMA-CA, M/G/1 PS

### 1. Wprowadzenie

W najbliższych latach systemy komunikacji bezprzewodowej będą integralną częścią przedmiotów codziennego użytku. Moduły bezprzewodowe będą nie tylko środkiem do przesyłania informacji o otoczeniu, ale sprawiają, że urządzenia zyskują nowe możliwości, których

wcześniej nie posiadały. Staną się one bardziej „inteligentne” i autonomiczne, dzięki czemu zbudowane z nich bezprzewodowe sieci sensorowe (BSS) udostępnią szeroki wachlarz nowych zastosowań, np. automatyzację budynków (sterowanie mediami czy kontrola dostępu), automatykę przemysłową (kontrola procesami, środowiska, zarządzanie energią), czy też aplikacje polepszające jakość życia (*healthcare*). Wszechstronność BSS w przyszłości może zmienić sposób postrzegania przez ludzi otaczającego ich świata oraz będzie mogła poprawić jakość i warunki życia.

Aby taki scenariusz stał się rzeczywistością, należy jeszcze rozwiązać wiele problemów, które znamy, ale i wiele, które dopiero się pojawiają. Z uwagi na wykorzystanie nośnika, jakim jest powietrze, systemy bezprzewodowe dość znacząco różnią się w swojej zasadzie działania od tradycyjnych systemów przewodowych. Zakłócenia, czy brak możliwości stwierdzenia kolizji transmitowanych danych, są problemem dość powszechnym. Następstwem takich problemów są techniki przeciwdziałające kolizjom. Opisany w dalszej części pracy mechanizm CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) jest tego dobrym przykładem.

Klasyczne modele, takie jak  $M/M/1$ ,  $M/D/1$ , czy opisany w dalszej części artykułu  $M/G/1$  z regulaminem PS (*Processor Sharing*) potrafiły w niemal doskonały sposób oddać charakter analizowanych systemów przewodowych. Wraz z pojawieniem się BSS i innych metod dostępu do nośnika, ich użyteczność niestety spadła. Nastąpiła więc potrzeba ich modyfikacji poprzez uwzględnienie specyfiki mechanizmu CSMA-CA używanego w takowych sieciach. Jedną z takich prób była przeprowadzona w pracy [2] modyfikacja modelu  $M/G/1$  PS. Modyfikacja ta pozwoliła w znaczący sposób podnieść stosowalność modelu, nawet przy dużym obciążeniu kanału transmisyjnego. Modyfikacja, polegająca na uwzględnieniu czasu oczekiwania związanego z mechanizmem CSMA-CA, okazała się jednak wrażliwa na rozmiar przesyłanych danych, w związku z czym pojawiła się konieczność kolejnej modyfikacji opisanej w dalszej części artykułu. Nowo powstały model nazwano  $M/G/1$  PS<sub>CSMA-CA</sub>.

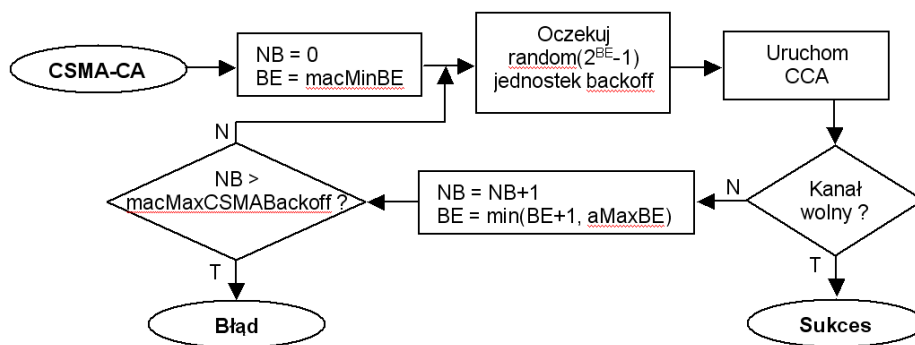
Poza stosowaniem narzędzi analitycznych, do badania BSS mogą być wykorzystane symulatory. Spośród symulatorów, dostępnych na rynku i umożliwiających analizę standardu IEEE 802.15.4, można wyróżnić symulatory działające na podstawie rozwiązań analitycznych lub opisujące fizykę danego zjawiska. Do pierwszej grupy można zakwalifikować symulator TrueTime, działający w środowisku Matlab [3], natomiast symulatorem opisującym zjawisko fizyczne jest przedstawiany w dalszej części pracy symulator NS (Network Simulator) [4]. Przy jego wykorzystaniu istnieje możliwość bardzo szerokiej analizy parametrów czasowych zjawisk zachodzących w BSS.

## 2. MECHANIZM CSMA-CA W IEEE 802.15.4

Standardem, który został stworzony z myślą o zastosowaniu w BSS, jest ratyfikowany przez organizację IEEE w maju 2003 roku standard LR-WPAN (*Low Rate Wireless Personal Area Network*) 802.15.4 [1, 2]. Standard ten definiuje dwie najniższe warstwy modelu ISO/OSI, tj. warstwę fizyczną (*Physical*) oraz dostępu do łącza danych (*Data Link*). Dzięki działaniu w nielicencjonowanym paśmie, zastosowaniu przepływności na poziomie 250 kb/s i prostych technik modulacji, standard umożliwia budowę tanich i niezwykle energooszczędnych modułów bezprzewodowych.

Standard LR-WPAN definiuje dwa mechanizmy dostępu do medium, które są stosowane w zależności od konfiguracji sieci. Pierwszym z nich jest mechanizm dostępu szczelinowego CSMA-CA (*slotted CSMA-CA*). Używany jest on podczas pracy sieci w trybie rozgłaszania tzw. superramki, gdzie początek i koniec transmisji jest ściśle określony i zdefiniowany przez urządzenie koordynujące. Za każdym razem, gdy urządzenie chce nadać informację, musi rozpoznać, gdzie rozpoczyna się i kończy szczelina czasowa dla niego przydzielona. Następnie po odczekaniu pewnej losowej chwili czasowej urządzenie musi „zawalczyć” z innymi stacjami o dostęp do niej [1]. Sieć pracuje wówczas w trybie tzw. Beacon-enabled.

Drugi z mechanizmów jest używany w sieci, gdzie nie ma ramki koordynującej pracę pozostałych urządzeń, a urządzenia rywalizują o dostęp do medium w dowolnych chwilach czasowych. Jest to tzw. tryb Nonbeacon-enabled. W trybie tym używany jest mechanizm pozbawiony szczelin (*unslotted CSMA-CA*) [1]. W tym przypadku, gdy urządzenie chce przesłać dane, musi odczekać losową porcję czasu, tzw. slotów czasowych (*BackoffPeriod*). Długość jednego slotu czasowego jest ściśle zdefiniowana i trwa 320  $\mu$ s. W pierwszym kroku urządzenie musi odczekać od 0 do  $2^{\text{BE}} - 1$  slotów, przy czym BE (*backoff exponent*) początkowo przyjmuje wartość 3. Po upływie tego czasu stacja za pomocą mechanizmu CCA (*Clear Channel Assessment*) sprawdza, w jakim stanie jest medium. Gdy medium jest wolne, to zgłaszany jest SUKCES i dane są wysyłane. W przeciwnym przypadku ponownie następuje losowanie oczekiwania porcji czasu z przedziału od 0 do  $2^{\text{BE}} - 1$ , lecz wartość wykładnika BE jest zwiększana o 1. Operacja ta przebiega do czasu, gdy wartość współczynnika NB nie przekroczy 5, po osiągnięciu 5 wskazana wartość pozostaje na niezmiennym poziomie. Algorytm mechanizmu CSMA-CA bez szczelin przedstawiono na rys. 1. W przypadku gdy urządzenie po przejściu przez procedurę dostępu do medium nie uzyska możliwości wysłania danych, np. na skutek zatłoczonego medium poprzez dużą liczbę transmisji pochodzących od innych urządzeń, zgłaszany jest BŁĄD wysłania danych.



Rys. 1. Algorytm realizacji mechanizmu CSMA-CA w IEEE 802.15.4

Fig. 1. Unslotted CSMA-CA in IEEE 802.15.4

Niezależnie od rodzaju stosowanego mechanizmu dostępu do nośnika ramki potwierdzenia danych są przesyłane natychmiast po ich odebraniu, więc w przypadku tym nie jest stosowany mechanizm CSMA-CA.

### 3. Model M/G/1 PS

Model  $M/G/1$  PS jest bardzo często używany do analizy sieci bezprzewodowych. Zastosowany w tym modelu regulamin PS zakłada, że wszystkie zgłoszenia przybywające do systemu są obsługiwane quasi-równocześnie [2, 6]. Model realizowany w ten sposób dosyć dobrze odzwierciedla mechanizmy zaimplementowane w stosie TCP/IP, które w naturalny sposób dążą do zapewnienia równego i sprawiedliwego dostępu do współdzielonego kanału transmisyjnego. Średni czas przebywania zgłoszenia w tak zdefiniowanym systemie można wyznaczyć za pomocą zależności (1):

$$W(x) = \frac{x}{r_{peak}} f_R, \quad (1)$$

gdzie  $r_{peak}$  jest maksymalną (szczytową) przepływnością strumienia ruchu,  $x$  jest rozmiarem przesyłanych danych, natomiast parametr  $f_R$  jest tzw. współczynnikiem opóźnienia. Wartość tego współczynnika, przy założeniu że jest tylko jedno stanowisko obsługi, można wyznaczyć na podstawie wzoru

$$f_R = 1 + \frac{1}{1 - \rho}, \quad (2)$$

gdzie  $\rho$  oznacza obciążenie kanału transmisyjnego o przepływności  $r_{peak}$ ,

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j x_j}{r_{peak}}. \quad (3)$$

Parametr  $\lambda$  równoważny jest intensywności zgłoszeń napływających do systemu. W takim wypadku równanie (1) przyjmuje postać

$$W(x) = \frac{x}{r_{peak}} \left( 1 + \frac{\rho}{1-\rho} \right) = \frac{x}{r_{peak}} \cdot \frac{1}{1-\rho}. \quad (4)$$

W pracy [6] zauważono, że wzór (4) może być stosowany jedynie przy stosunkowo małym obciążeniu kanału transmisyjnego ( $\rho < 0,05$ ), co szczególnie w BSS o niskich przepływnościach może dość skutecznie ograniczać jego stosowalność.

## 4. Zmodyfikowany model M/G/1 PS dla mechanizmu CSMA-CA

### 4.1. M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> wersja 1

W pracy [2] zaproponowano modyfikację klasycznego modelu M/G/1 PS, co poszerzyło możliwości wykorzystania tegoż modelu do analiz czasowych w BSS. Czasy związane z mechanizmem CCA opisanym w punkcie 2 oraz czasem oczekiwania losowej wartości slotów czasowych zostały uwzględnione poprzez parametr  $\Psi_{Backoff}$ . Pozwoliło to w znaczący sposób zwiększyć stosowalność modelu M/G/1 PS.

Ostatecznie średni czas przebywania zadania w systemie został opisany wg zależności:

$$W(x) = \frac{x}{r} \frac{1}{1 - \frac{\rho_{Backoff}}{N}}, \quad (5)$$

gdzie

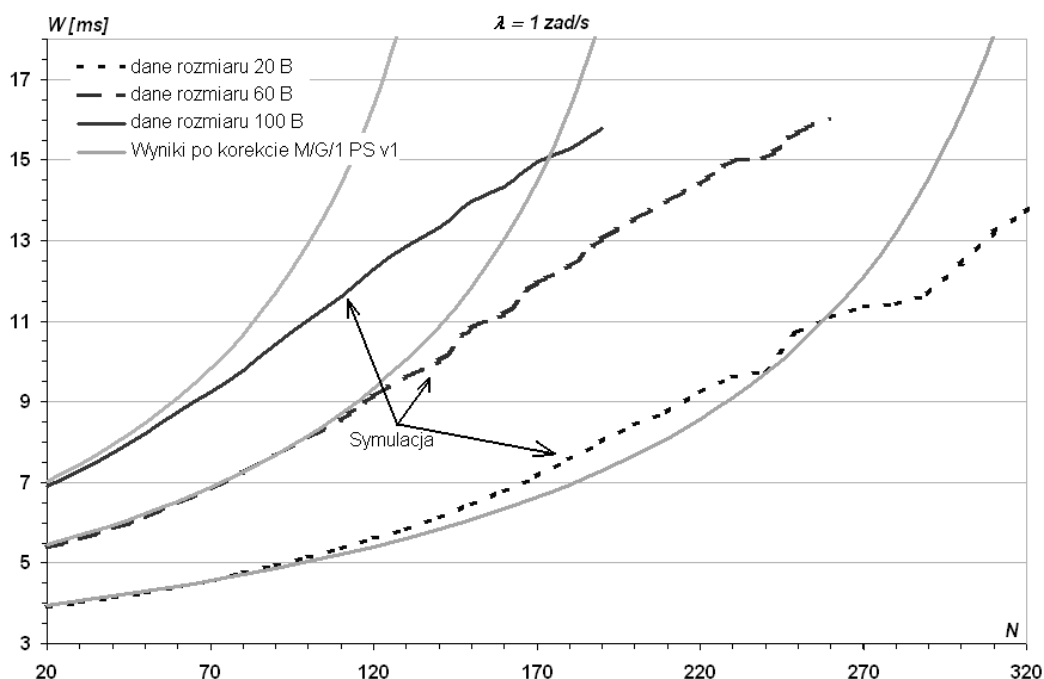
$$\rho_{Backoff} = \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j (x_j - \Psi_{Backoff})}{r}, \quad (6)$$

$$r = V - [(x - \Psi_{Backoff})(N - 1)\lambda]. \quad (7)$$

$N$  jest liczbą klientów (węzłów) sieci bezprzewodowej,  $V$  – przepływność sieci bezprzewodowej, natomiast  $\lambda$  jest intensywnością generowanych zadań komunikacyjnych.

### 4.2. M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> wersja 2

Po przeprowadzeniu szczegółowej analizy średniego czasu przebywania zadania w systemie uzyskanego z symulatora NS-2 i zależności (5) zauważono, że wyniki są szczególnie wrażliwe na rozmiar przesyłanych danych. Błąd oszacowania średniego czasu przebywania zadania w systemie rośnie wraz ze wzrostem liczby węzłów i rozmiaru przesyłanych danych przy niezmięionej intensywności ich przesyłania (rys. 2).



Rys. 2. Średni czas przebywania zadania w systemie z NS-2 i M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> v1  
 Fig. 2. Mean sojourn time from NS-2 and M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> v1

Ponadto, współczynniki opóźnienia występujące zarówno we wzorze (1), jak i (5) szybko rosną wraz ze wzrostem liczby węzłów, rozmiarem przesyłanych danych oraz intensywności ( $\rho$ ,  $\rho_{Backoff}$ ). Dodatkowo zauważono, że wymienione funkcje mają asymptoty pionowe w punkcie 1. Na podstawie analiz statystycznych wyników symulacji zauważono dodatkowy silny związek między współczynnikiem opóźnienia a tzw. narzutem protokołu, czyli stosunkiem danych wraz z nagłówkami pochodzącymi od użytego protokołu do czystych danych do przesłania. Z tego też powodu proponuje się modyfikację wzoru (5) poprzez wprowadzenie współczynnika korekcji  $\kappa$ :

$$W(x) = \frac{x}{r} \frac{1}{1 - \frac{\rho_{Backoff}}{N}} \kappa, \quad (8)$$

gdzie  $\kappa = 1 - \rho^\sigma$ .

Oznaczając przez  $x_D$  rozmiar czystych danych do przesłania,  $x_N$  – rozmiar nagłówków od poszczególnych warstw modelu IOS/OSI, wartość wykładnika  $\sigma$  można obliczyć z następującej zależności:

$$\sigma = \sqrt{3} \frac{x_D + x_N}{x_D}. \quad (9)$$

Zaproponowany współczynnik korekcji istotnie zmniejsza błąd oszacowania średniego czasu przebywania zadania w systemie, co zostanie zaprezentowane w punkcie 5.

## 5. Symulacje i wyniki obliczeń

Do przeprowadzenia symulacji użyto symulatora Network Simulator (NS) w wersji drugiej. Symulator sieci NS jest bardzo popularnym narzędziem do analizy zachowania się sieci komputerowych. Jego rozwój rozpoczął się w latach pięćdziesiątych ubiegłego stulecia i nadal wspierany jest przez Agencję Zaawansowanych Obronnych Projektów Badawczych Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych – DARPA oraz Uniwersytet Południowej Kalifornii [4].

Otwarty kod (ang. *open-source project*) sprawia, że istnieje możliwość rozbudowania go o nowe funkcjonalności lub modyfikowania modułów już istniejących, tworząc nową jakość. Generator liczb losowych używany w NS jest implementacją generatora zaproponowanego w latach '70 przez IBM System/360 [5]. Podobne generatory są obecnie powszechnie używane, m.in. przez produkty firmy Mathworks w oprogramowaniu Matlab, czy też biblioteki numeryczne IMSL. Obecnie symulator NS jest uważany za standard wśród symulatorów sieciowych i używany jest przez blisko tysiąc instytucji na całym świecie.

Podobnie jak w pracy [2] analizie poddano system, w którym węzły sieci IEEE 802.15.4 wysyłały dane do węzła głównego. Praca węzłów odbywała się w strukturze gwiazdy. Moc nadawania została ustawiona na 30 metrów, natomiast promień okręgu gwiazdy na 5 m, co eliminowało efekt „ukrytego węzła” (*hidden node problem*).

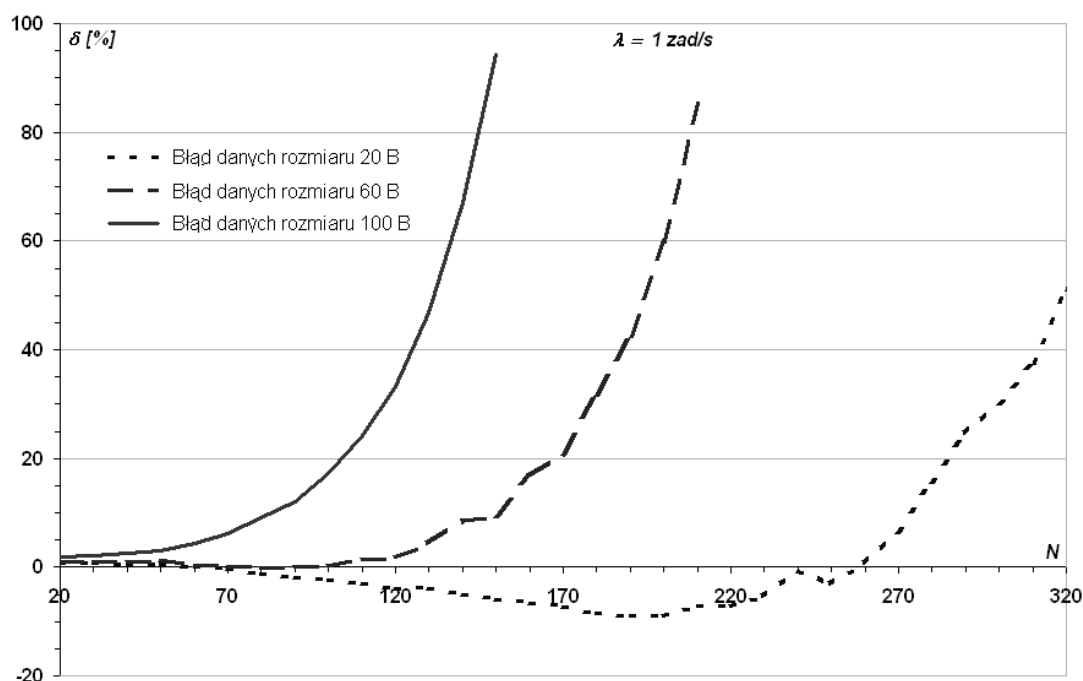
Tabela 1

Parametry ustawień symulatora NS-2

Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
PHY	8 B	$V$	250 kb/s
MAC	7 B	$N$	$20 - \rho \leq 1$ co 20
ACK	3 B	zasięg	30 m
Rozmiar danych	20 – 100 B co 10 B	$\lambda$	rozkład wykładniczy ze średnią intensywnością $\lambda = 1$ zad/s

Wewnątrz okręgu znajdował się węzeł główny. Każdy z węzłów nadawał jednakową porcję danych z taką samą średnią intensywnością. Rozkład czasu pomiędzy kolejnymi zgłoszeniami był zgodny z rozkładem wykładniczym z parametrem  $\lambda$ . Podstawowe informacje związane z ustawieniem symulacji zestawiono w tabeli 1.

Analizując błąd względny ( $\delta$ ) danych uzyskanych z symulatora oraz za pomocą zależności (5), zauważono, że oszacowanie średniego czasu przebywania zadania w systemie dość szybko przekracza akceptowalny próg użyteczności. Co ciekawe, nie wynika to wprost z obciążenia łącza, czyli parametru  $\rho$ , lecz w głównej mierze zależy od rozmiaru czystych danych do przesyłania. Dla wybranych rozmiarów danych zostało to przedstawione na rys. 3.



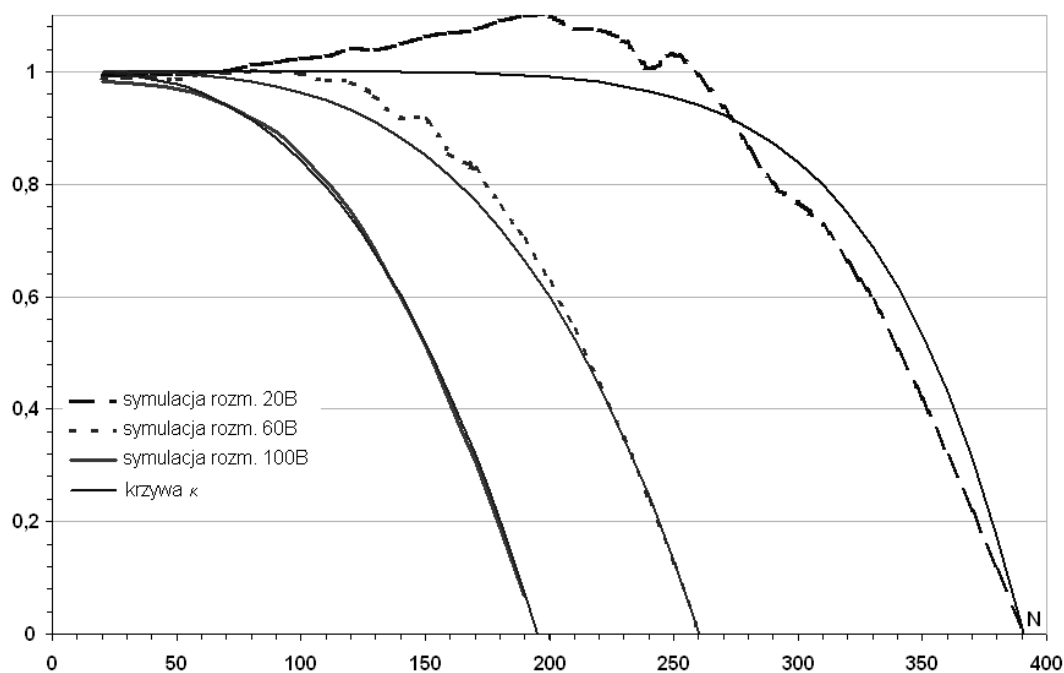
Rys. 3. Błąd względny modelu M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub>v1  
 Fig. 3. The relative error M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> v1

Zdecydowano się więc poddać głębszej analizie to zjawisko. Dzieląc wyniki uzyskane z zależności (5) przez wyniki uzyskane z symulacji, zauważono, że wartości układają się w pewne charakterystyczne krzywe, które w zdecydowanej większości zawierają się w przedziale (1,0). Dodatkowo, punkt przecięcia z osią  $x$  przebiega w momencie, gdy parametr  $\rho$  osiąga wartość 1 (rys. 4).

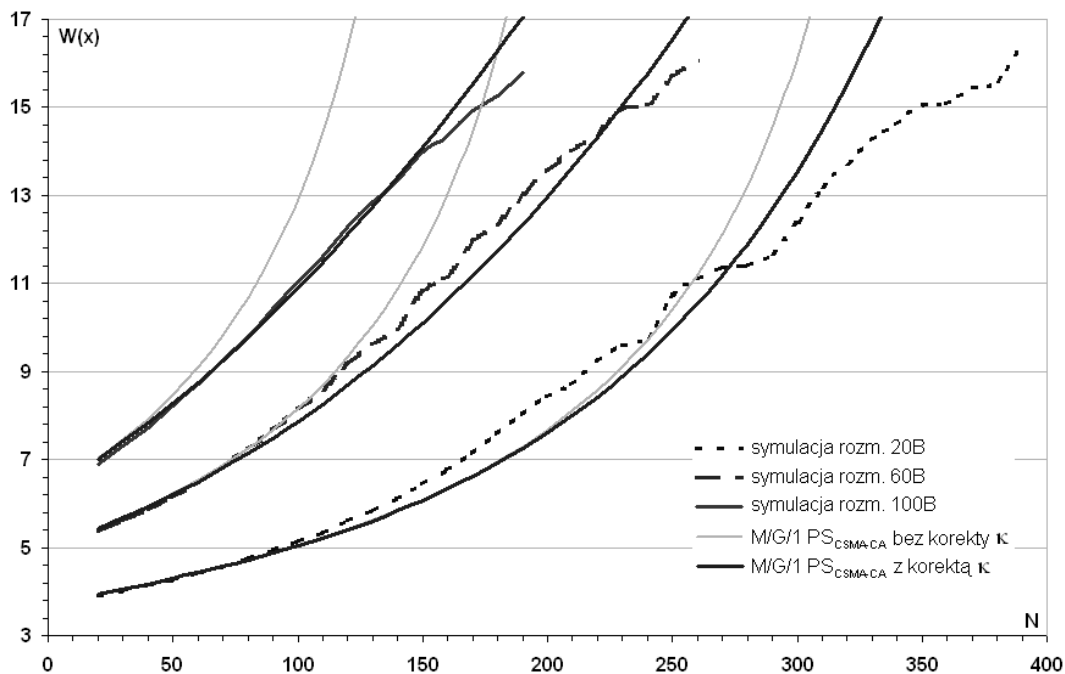
W kolejnym kroku należało znaleźć korelację pomiędzy rozmiarem przesyłanych danych a uzyskaną krzywą. Po analizie uzyskanych wyników dostrzeżono zależność pomiędzy narzutem protokołu IEEE 802.15.4, rozmiarem przesyłanych danych, parametrem  $\rho$  a uzyskaną krzywą. W efekcie dalszych prac otrzymano współczynnik korekcji  $\kappa$  przedstawiony we wzorze (8). Rysunek 5 przedstawia uzyskane wyniki oszacowania średniego czasu przebywania zadania w systemie przed i po korekcie współczynnikiem  $\kappa$ .

W celu zobrazowania zysku wnoszonego przez współczynnik korekcji w tabeli 2 przedstawiono maksymalną liczbę węzłów możliwych do oszacowania wartości średniego czasu przebywania zadania w systemie przy wykorzystaniu formuły (5) i (8). Próg błędu został ustalony na 10% w stosunku do wyników z symulatora.





Rys. 4. Krzywa rozbieżności pomiędzy symulacją z ns-2 a wzorem (5)  
 Fig. 4. Divergence curve between ns-2 and formula (5)



Rys. 5.  $W(x)$  przed i po korekcie współczynnikiem  $\kappa$   
 Fig. 5.  $W(x)$  before and after correction by  $\kappa$

Tabela 2

Maksymalna liczba węzłów możliwych do analizy przy 10% progu błędu

Rozmiar danych [B]	Maksymalna liczba węzłów			Wzrost	
	M/G/1 PS klasyczny	M/G/1 PS <sub>CSMA-CA</sub> przed korektą $\kappa$	M/G/1 PS <sub>CSMA-CA</sub> po korekcie $\kappa$	l. węzłów	%
20	ok. 50	270	310	40	14,81
30	ok. 40	230	300	70	30,43
40	ok. 40	200	280	80	40,00
50	ok. 40	160	270 $\rightarrow \rho = 1$	110	68,75
60	ok. 40	150	249 $\rightarrow \rho = 1$	99	66,00
70	ok. 40	120	230 $\rightarrow \rho = 1$	110	91,67
80	ok. 40	100	215 $\rightarrow \rho = 1$	115	115,00
90	ok. 30	90	201 $\rightarrow \rho = 1$	111	123,33
100	ok. 30	80	189 $\rightarrow \rho = 1$	109	136,25

## 6. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano nowy model M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> rozbudowany o współczynnik korekcji  $\kappa$ . W modelu opisanym wg zależności 5 średni czas przebywania zadania w systemie, dla danych o rozmiarze większych od 50B, jest szacowany z dużym błędem. Zaproponowany współczynnik  $\kappa$  istotnie zmniejsza błędy w szerokim zakresie rozmiarów przesyłanych danych.

Jeżeli  $\rho$  potraktujemy jako prawdopodobieństwo tego, że kanał obsługi jest zajęty, to  $\rho^\sigma$  oznaczać będzie prawdopodobieństwo  $\sigma$  kolejnych zajętości przestrzeni komunikacyjnej.  $1 - \rho^\sigma$  można zinterpretować wówczas jako informację o średniej liczbie kolejnych okresów  $\rho$ , które węzeł będzie musiał odczekać, aby dostać się do medium transmisyjnego, by wysłać informację. Przekładając to na mechanizm CSMA-CA zastosowany w IEEE 802.15.4, można to utożsamić z informacją, ile razy średnio węzeł przed dostaniem się do wolnego medium przejdzie procedurę losowania slotów Backoff i sprawdzania, czy medium jest wolne.

Zaprezentowane podejście wydaje się być bardziej komplementarne w porównaniu do opisanego w pracy [2], co potwierdzają uzyskane wyniki przedstawione w tabeli 2.

## BIBLIOGRAFIA

1. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). IEEE Computer Society, 1 October 2003.

2. Eljasz D.: Modele kolejkowe w analizie sieci IEEE 802.15.4. *Studia Informatica*. 2011, Vol. 32, No. 3A (98), s. 31÷42.
3. Ohlin M., Henriksson D., Cervin A.: *TrueTime 1.5 Reference Manual*. Department of Automatic Control, Lund University, Sweden, 2007.
4. McCanne S., Floyd S.: *UCB/LBNL/VINT Network Simulator – ns (version 2)*. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, April 1999.
5. Lewis P. A., Goodman A. S., Miller J. M.: A Pseudo-Random Number Generator for the System/360. *IBM System Journal* 8(2), s. 136÷146, 1969.
6. Stasiak M., Głabowski M., Zwierzykowski P.: *Modelowanie i wymiarowanie ruchomych sieci bezprzewodowych*, WKŁ, 2009.

Wpłynęło do Redakcji 18 marca 2012 r.

## Abstract

In the paper new M/G/1 PS for CSMA-CA (Processor Sharing for Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) mechanism for analyzing of wireless sensor networks IEEE 802.15.4 were presented. In the early chapters, a general introduction to the Wireless Sensors Network (WSN) and CSMA-CA mechanism (Fig. 1) which is used in IEEE 802.15.4 were outlined. In chapter 3 basic information about the classic M/G/1 PS queuing model and formulas for mean sojourn time in such systems (Formulas 1) was shown. The formulas for new M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> systems such as mean sojourn time (Formula 5) and a new correction factor for M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> system (Formulas 8) in chapter 4 were presented. Simulation and calculation of the mean sojourn time parameter with or without the correction factor and influence numbers of nodes and size of data (Fig. 5) on this parameters in chapter 5 was analyzed. In the summary the final conclusions about correction factor and influence this factor on final error M/G/1 PS<sub>CSMA-CA</sub> systems were outlined.

## Adresy

Dariusz ELJASZ: Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Metrologii Elektrycznej,  
ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, Polska, d.eljasz@ime.uz.zgora.pl

Jacek BOJARSKI: Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Matematyki, Informatyki  
i Ekonometrii, ul. Podgórna 50, 65-246 Zielona Góra, Polska, j.bojarski@wmie.uz.zgora.pl