

Politechnika Śląska  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki

Dariusz Kurzyk

**Modele kolejkowe z opóźnionym wybudzaniem  
serwera**

Autoreferat rozprawy doktorskiej  
napisanej pod kierunkiem  
dr. hab. inż. Wojciecha Kempy

Gliwice 2016

## Spis treści

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1. | Wprowadzenie                                      | 3  |
| 2. | Cel i teza rozprawy                               | 4  |
| 3. | Modele kolejkowe z opóźnionym wybudzaniem serwera | 5  |
| 4. | Wyniki badań                                      | 6  |
| 5. | Układ pracy                                       | 8  |
| 6. | Podsumowanie                                      | 8  |
| 7. | Dorobek naukowy                                   | 10 |
|    | Literatura  | 11 |

---

# 1. Wprowadzenie

Rozwój technologii w dziedzinie telekomunikacji oraz sieci i systemów komputerowych jest możliwy m.in. dzięki wynikom rozważań osiągniętych na polu teorii kolejek zwanej również teorią obsługi masowej. Przedmiotem zainteresowania teorii kolejek są systemy, w których występuje zjawisko kumulacji napływających zleceń, które następnie w odpowiedni sposób zostają obsłużone. Znaczenie tego typu systemów stale wzrasta m.in. ze względu na postępującą informatyzację społeczeństw oraz fakt, że w ostatnich dziesięcioleciach internet stał się nieodłącznym elementem życia ludzi na całym świecie. Obecnie teoria kolejek jest powszechnie wykorzystywana do oceny efektywności oraz zapewnienia odpowiednich wymogów jakościowych (QoS) różnego rodzaju systemów telekomunikacyjnych.

Tematyka niniejszej rozprawy wpisuje się w nurt badań nad zagadnieniami pochodzącymi z teorii masowej obsługi, z naciskiem na analizę systemów kolejkowych znajdujących zastosowanie w sieciach komputerowych i telekomunikacji. W szczególności, przedmiotem rozważań ujętych w pracy są jednokanałowe modele kolejkowe z poissonowskim strumieniem wejściowym, skończonym buforem kolejki oraz mechanizmem opóźnionego wybudzania stacji obsługi po okresie jej bezczynności. Modele kolejkowe z różnego rodzaju ograniczeniami dostępu do stacji obsługi są obecnie intensywnie rozwijane. Ze względu na ich charakterystyczne właściwości, można je wykorzystać do modelowania procesów zachodzących np. w węzłach sieci komputerowych takich jak sieci IP, czy też bezprzewodowych sieciach sensorowych, w których mają miejsce zjawiska związane z akumulacją pakietów w buforze urządzenia sieciowego, przetwarzaniem pakietów, utratą pakietów na skutek przepełnienia bufora, nieprzerwaną obsługą pakietów, czy też opóźnieniem kolejkowania spowodowanym oczekiwaniem pakietów w buforach itd. Ponadto, modele kolejkowe z ograniczeniami w dostępie do serwera umożliwiają bardziej precyzyjny opis rzeczywistych systemów, gdzie może dojść do tymczasowej dezaktywacji serwera, co prowadzi do blokady procesu obsługi pakietów lub gdzie serwer po wybudzeniu potrzebuje pewnego czasu na osiągnięcie pełnej gotowości operacyjnej. Ogólna postać zaprezentowanych w pracy wyników umożliwia modelowanie systemów, w których obsługa pakietów jest realizowana według dowolnych rozkładów prawdopodobieństwa, a w szczególności rozkładów z ciężkim ogonem, co ma niebagatelne znaczenie w ocenie pracy sieci i systemów komputerowych [1–5].

Precyzyjne modelowanie kolejkowania ruchu sieciowego ma istotny wpływ na projektowanie urządzeń sieciowych pod względem ich wydajności, kosztów produkcji i użytkowania. Przykładem mogą być bezprzewodowe sieci sensorowe zbudowane z przestrzennie rozproszonych czujników, które wykorzystywane są do monitorowania fizycznych i środowiskowych warunków, takich jak ciśnienie, temperatura, wilgotność, czy też hałas. Ze względu na szeroki wachlarz zastosowań sieci senso-

---

rowych m.in. w monitorowaniu zanieczyszczenia powietrza, monitorowaniu natężenia ruchu drogowego, projektowaniu systemów detekcji pożarów itp., węzły sieci są często rozmieszczone w trudno dostępnych miejscach. Stąd wymiana ich źródeł zasilania jest problematyczna. Oszczędność energii w kontekście teorii kolejek jest w ostatnim czasie zagadnieniem intensywnie eksplorowanym. W pracach [6, 7] zaprezentowano jednokanałowy model kolejkowy z poissonowskim strumieniem wejściowym, nieskończonym buforem oraz opóźnionym wybudzaniem serwera jako model umożliwiający bardziej wydajne użytkowanie baterii w węzłach sieci sensorowych. Podobnie, problem oszczędności energii został poruszony w pracach [8–10], w których przedstawiono modele kolejkowe z różnymi mechanizmami wybudzania serwera. Niemniej jednak, w literaturze większość wyników analitycznych dla modeli kolejkowych z ograniczeniami w dostępie do serwera dotyczy stanu ustalonego systemu. Charakterystyki stanu ustalonego ilustrują długoterminową pracę systemu, co daje podstawy do oceny efektywności ich pracy. W praktyce jednak tranzytywna analiza systemów kolejkowych jest niezbędna, co wynika m.in. z faktu występowania w ruchu sieciowym zjawisk takich jak spiętrzenie pakietów (ang. *burstiness*) [11–13], długookresowa zależność (ang. *long-range dependence*) [14, 15], czy też samopodobieństwo (ang. *self-similarity*) [16–18], co może prowadzić do sytuacji, w której stan ustalony jest w krótkim horyzoncie czasu nieosiągalny dla systemu. Ponadto, tranzytywna analiza zachowania systemów kolejkowych dobrze ilustruje ich pracę bezpośrednio po ich uruchomieniu, w okresach przestoju, w sytuacjach destabilizacji pracy serwera, a także w przypadku, gdy stabilizacja systemu trwa relatywnie długo np. wskutek dużego obciążenia lub nieregularnego ruchu wejściowego.

## 2. Cel i teza rozprawy

### Cel rozprawy

*Celem rozprawy jest stochastyczna analiza modeli kolejkowych z ograniczonym dostępem do stacji obsługi i progową bądź probabilistyczną dyscypliną wybudzania serwera, a przedstawione w niej rezultaty badań dotyczą*

- *precyzyjnego i efektywnego modelowania ruchu sieciowego, gdzie uwzględniony jest skończony rozmiar buforów urządzeń sieciowych oraz mechanizmy wybudzania serwera;*
- *kluczowych charakterystyk modeli w stanie ustalonym i nieustalonym wyznaczonych analitycznie w postaci jawnej;*
- *strumienia wejściowego w postaci zarówno pojedynczych jak i grup pakietów;*
- *numerycznej analizy funkcjonowania rozważanych modeli.*

---

## Teza rozprawy

*Metody matematyczne oparte na włożonych łańcuchach Markowa, potencjale błędzenia losowego, twierdzeniu o prawdopodobieństwie całkowitym dla ciągłych zmiennych losowych oraz zagadnieniach pochodzących z teorii odnowy i algebry liniowej dają możliwość precyzyjnego i efektywnego modelowania zachowania systemów kolejkowych z różnymi dyscyplinami wybudzania stanowiska obsługi zarówno w stanie ustalonym jak i nieustalonym.*

## 3. Modele kolejkowe z opóźnionym wybudzaniem serwera

Modele kolejkowe z różnego rodzaju ograniczeniami w pracy i dostępie do stanowiska obsługi są istotne m.in. z punktu widzenia optymalizacji pracy serwera, np. w kontekście oszczędności poboru energii, czy też z punktu widzenia fizycznych ograniczeń modelowanego systemu, np. w kontekście czasu potrzebnego na regenerację i przygotowanie stanowiska obsługi zgłoszeń do pełnej gotowości .

W ramach systemów kolejkowych z ograniczonym dostępem do stanowiska obsługi można wyróżnić klasę systemów z tzw. *opóźnionym wybudzaniem serwera*, w których po zakończeniu okresu bezczynności serwer nie rozpoczyna pracy wraz z pojawieniem się pierwszego zgłoszenia, lecz pierwsza obsługa inicjowana jest później, przy czym kolejne odbywają się już bez zakłóceń. Niniejsza rozprawa dotyczy następujących typów dyscyplin wybudzania stanowiska obsługi:

- $N$ -dyscyplina wybudzania serwera ( $N$ -policy), gdzie serwer rozpoczyna pracę dopiero wówczas, gdy liczba zgłoszeń zakumulowanych w kolejce osiągnie pewną ustaloną z góry progową wartość  $N$ ;
- mechanizm probabilistycznego wybudzania serwera, gdzie po wpłynięciu do pustego systemu pierwszego pakietu serwer potrzebuje pewnego czasu (*setup time*) na uzyskanie pełnej gotowości do pracy i dopiero po upływie tego czasu rozpoczyna się obsługa pakietów;

Przegląd różnego typu modeli kolejkowych z ograniczonym dostępem do stacji obsługi można znaleźć w pozycji [24].

W kontekście modeli kolejkowych z ograniczonym dostępem do stacji obsługi, w [6, 7] zaproponowano wykorzystanie systemu kolejkowego typu  $M/G/1$  z  $N$ -dyscypliną wybudzania serwera do modelowania mechanizmu oszczędzania energii w węzłach sieci sensorowych. Podobne mechanizmy modelowane poprzez systemy kolejkowe z różnego rodzaju przestojami pracy serwera zostały omówione w [8–10].

---

Zależny od czasu rozkład prawdopodobieństwa długości kolejki dla modeli z nieskończonym buforem i  $N$ -dyscypliną wybudzania oraz innymi ograniczeniami narzuconymi na pracę serwera można znaleźć w [25, 26]. W pracy [29] przedstawiono charakterystykę czasu oczekiwania pakietów w buforze kolejki dla systemów z pojedynczym okresem regeneracji serwera. W [32] wyznaczono charakterystykę procesu liczącego obsłużone zgłoszenia dla systemu z nieskończonym buforem kolejki, strumieniem zgłoszeń w postaci złożonego procesu Poissona oraz pojedynczym okresem regeneracji serwera. Natomiast w [33] wyznaczono proces liczący obsłużone zgłoszenia dla systemu ze skończonym buforem i grupowym napływem zgłoszeń. W [34–36] przedstawiono analizę zachowania pakietów w systemach z probabilistycznym wybudzaniem serwera w stanie ustalonym. Rezultaty dotyczące analizy zużycia energii przez węzły sieci sensorowych za pomocą modeli kolejkowych z probabilistycznym wybudzaniem serwera można znaleźć w [22, 37], gdzie druga pozycja odnosi się do modelu usypiania/wybudzania serwera zgodnie z protokołem IEEE 802.15.4. Ponadto, w pozycji [38] można znaleźć wyniki badań na temat wykorzystania rozważanego modelu w kontekście sieci komórkowych, natomiast w [23] opisano zużycie energii przez centra danych z serwerami wyposażonymi w mechanizmy kontroli ich pracy. W pracy [21] opisano zależną od czasu charakterystykę długości kolejki w kontekście linii produkcyjnej, gdzie okresy pracy stanowiska obsługi poprzedzone są losowym czasem niezbędnym do uzyskania przez maszynę pełnej gotowości do pracy, natomiast okresy bezczynności poprzedzone są losowym czasem niezbędnym do zatrzymania maszyny. W pracy [39] opisano proces liczący obsłużone zgłoszenia dla systemów ze skończonym buforem, gdzie strumień wejściowy jest typu BMAP. Ponadto, w pracach [40, 41] scharakteryzowano proces liczący obsłużone zgłoszenia dla linii produkcyjnych w kontekście różnego typu przestoju, np. spowodowanych osiągnięciem pełnej gotowości do pracy, awariami, naprawami, czy cyklicznymi okresami pracy.

## 4. Wyniki badań

Zaprezentowane w pracy wyniki badań dotyczą tranzytywnych charakterystyk modeli kolejkowych ze skończonym buforem, jedną stacją obsługi zgłoszeń, poissonowskim strumieniem wejściowym oraz mechanizmami  $N$ -progowej i probabilistycznej dyscypliny wybudzania serwera. Założenie skończoności bufora jest znaczące w przypadku opisu procesów zachodzących w sieciach komputerowych. Występujące w ruchu sieciowym zjawiska mają niejednokrotnie charakter losowy o rozkładzie prawdopodobieństwa z ciężkim ogonem, którego wariancja może być nieskończona. Stąd nawet duże rozmiary buforów kolejek w urządzeniach sieciowych nie zapobiegają występowaniu strat. Uzyskane w pracy wyniki analityczne podane są w postaci transformat Laplace’a oraz funkcji tworzących transformat Laplace’a cha-

---

rakterystyk, które w praktyce mogą posłużyć do zapewnienia odpowiedniej jakości usług projektowanych systemów. W pracy uzyskano szczegółowe wyniki dla charakterystyk takich jak długości kolejki [42–45], wirtualny czas oczekiwania [46] oraz proces liczący obsłużone zgłoszenia [47–49] w modelach kolejkowych ze wspomnianymi wcześniej dyscyplinami wybudzania serwera. Na ich podstawie w prosty sposób można wyznaczyć długość okresów przepełnienia bufora systemu, czy też estymować współczynnik strat. Ponadto, część zaprezentowanych charakterystyk odnosi się zarówno dla pojedynczego jak i grupowego napływu pakietów do systemu.

Zaprezentowane w pracy wyniki dla tranzytywnych charakterystyk kolejkowych zostały uzyskane za pomocą podejścia opartego na metodologii włożonych łańcuchów Markowa, gdzie badane rozkłady prawdopodobieństwa opisane są przez układy równań całkowych Volterra, sformułowane na podstawie twierdzenia o prawdopodobieństwa całkowitym dla ciągłych zmiennych losowych. Wyznaczone układy równań następnie są rozwiązywane za pomocą metody potencjału błędzenia losowego. Ponadto, w przeprowadzonych rozważaniach wykorzystano fakty z teorii odnowy oraz algebry liniowej. Uzyskane charakterystyki mają postaci transformat Laplace’a lub funkcji tworzących transformat Laplace’a rozkładów prawdopodobieństw, gdzie do ich odwracania wykorzystano odpowiednio wzór całkowy Bromwicha lub wzór całkowy Cauchy’ego.

Ponadto, przedstawione wyniki teoretyczne zostały uzupełnione o liczne przykłady numeryczne przygotowane za pomocą środowiska obliczeniowego **Mathematica** 9.0.1.0. Poprawność zaprezentowanych rozważań została zweryfikowana metodą *symulacji zdarzeń dyskretnych* przy pomocy pakietu **SimPy** 3.0.7 języka programowania **Python** 3.4. Charakterystyki przykładowych systemów zostały poddane analizie wrażliwości na zmiany parametrów rozpatrywanych systemów.

Dzięki zawartym w pracy wynikom badań można m.in. odpowiedzieć na pytania jak zmiana intensywności wpływu pakietów do routera IP, czy węzła bezprzewodowej sieci sensorowej wpływa na:

- długość kolejki,
- współczynnik utraty pakietów,
- czas trwania okresów przestoju (okresów energooszczędnych) oraz okresów pracy serwera,
- czas oczekiwania pakietów w buforze urządzenia sieciowego,
- liczbę transmitowanych pakietów w określonym czasie.

Podobne pytania można zadać w kontekście zmiany szybkości obsługi pakietów przez serwer. Ponadto, możliwe jest zbadanie, jaka jest relacja pomiędzy wyżej wymienio-

---

nymi zjawiskami, a stanem początkowym systemu, gdzie zaaplikowana jest probabilistyczna dyscyplina wybudzania. Ważną kwestią, którą również można rozstrzygnąć na podstawie materiałów zaprezentowanych w rozprawie jest określenie, po jakim czasie praca systemu stabilizuje się oraz jaki wpływ na stabilizację systemu ma jego stan początkowy.

## 5. Układ pracy

Zawarte w pracy wyniki zostały przedstawione według następującego porządku. W Rozdziale 1 opisano wstępne informacje na temat teorii kolejek, a także wykorzystanej w badaniach metodologii. Kolejny Rozdział 2 przedstawia znane już wyniki na temat zależnych od czasu rozkładów prawdopodobieństwa długości kolejki oraz opóźnienia kolejkowania w systemach typu  $M/1/G/K$ . Rozdziały 3 i 4 stanowią główną część rozprawy. Zaprezentowanie w nich rezultaty dotyczą tranzytywnych charakterystyk długości kolejki, opóźnienia kolejkowania oraz procesu liczącego obsłużone zgłoszenia w modelach typu  $M/1/G/K$  odpowiednio z  $N$ -progową i probabilistyczną dyscypliną wybudzania serwera. Wyniki odnoszą się do kolejkowania procesów Poissona, a część z nich dotyczy również złożonych procesów Poissona. Informacje uzupełniające dotyczące wykorzystywanych narzędzi matematycznych znajdują się w części A dołączonego załącznika, natomiast kod programu umożliwiającego przeprowadzenie odpowiednich symulacji zdarzeń dyskretnych można znaleźć w części B załącznika.

## 6. Podsumowanie

W niniejszej rozprawie omówiono w sposób kompleksowy charakterystyki długości kolejki, opóźnienia kolejkowania oraz procesu liczącego obsłużone zgłoszenia dla jednokanałowych modeli kolejkowych z poissonowskim strumieniem zgłoszeń, skończonym buforem oraz mechanizmami wybudzania stanowiska obsługi. Uzyskane wyniki dotyczą kolejkowania procesów Poissona, a część z nich odnosi się również do złożonych procesów Poissona. W ramach rozpatrywanych dyscyplin znalazły się  $N$ -progowa i probabilistyczna dyscyplina wybudzania stanowiska obsługi, które umożliwiają modelowanie systemów z różnego rodzaju ograniczeniami w dostępie do serwera wynikającymi m.in. z zastosowanych mechanizmów oszczędzania zużycia energii, czy fizycznych cech serwera np. związanych z czasem osiągnięcia pełnej gotowości operacyjnej. Opisane w pracy charakterystyki można wykorzystać m.in. do aproksymacji współczynnika utraty pakietów, czy też wyznaczenia prawdopodobieństwa utraty pakietów.

Zaprezentowane wyniki zostały otrzymane za pomocą metod analitycznych, które



---

z powodzeniem można wykorzystać do wyznaczenia wielu nowych charakterystyk dla systemów kolejkowych z różnymi ograniczeniami narzuconymi na pracę serwera. Zastosowana metodologia umożliwia tranzytywny opis pracy systemów kolejkowych w zwartej postaci, co redukuje nakład czasu niezbędny na implementacje poszczególnych charakterystyk. Poza tym, pomimo skomplikowanej struktury statystycznego opisu ruchu sieciowego modelowanego za pomocą wykorzystanej metodologii, wyniki numeryczne możliwe są do uzyskania na przeciętnej klasy komputerze osobistym. Oczywiście w przypadku systemów kolejkowych o dużych buforach kolejek, gdzie czas obsługi zgłoszeń ma skomplikowany rozkład prawdopodobieństwa obliczenia numerycznie wymagają odpowiednio większych zasobów obliczeniowych.

Zawarte w pracy rezultaty badań są interesujące zarówno ze względu na teoretyczne jak i praktyczne aspekty związane z teorią kolejek. W pracy pokazano, że jest możliwy matematyczny, zwarty opis zachowania systemów kolejkowych z dyscyplinami wybudzania w dowolnej chwili czasu, co daje możliwość efektywnego modelowania tego typu systemów w stanie nieustalonym oraz ustalonym. Należy zwrócić uwagę na fakt, że założenie skończoności bufora systemu oraz ogólna postać zaprezentowanych charakterystyk umożliwiająca modelowanie obsługi zgłoszeń za pomocą rozkładów prawdopodobieństwa z ciężkimi ogonami daje to możliwość precyzyjnego opisu statystycznych właściwości ruchu sieciowego w węzłach urządzeń sieciowych. Z praktycznego punktu widzenia, przedstawione w pracy rezultaty badań, a także nowe charakterystyki wyznaczone za pomocą użytej w rozprawie metodologii można wykorzystać do oceny wydajności oraz zapewnienia jakości różnego rodzaju usług telekomunikacyjnych.

Rezultaty rozważań teoretycznych zostały uzupełnione o liczne przykłady numeryczne ilustrujące zachowanie poszczególnych charakterystyk systemów kolejkowych w kontekście ruchu sieciowego.

Ponadto, w pracy zostały szczegółowo omówione narzędzia matematyczne (np. metoda potencjału błędzenia losowego) wykorzystane do wyznaczenia charakterystyk oraz metody obliczeniowe (np. numeryczne algorytmy odwracania transformaty Laplace'a i funkcji tworzących) umożliwiające praktyczne korzystanie z przedstawionych rezultatów teoretycznych.

---

## 7. Dorobek naukowy

### Lista ministerialna A

- A. Glos, D. Kurzyk, *Quantum inferring acausal structures and the Monty Hall problem*, preprint arXiv:1504.01917 (2015), przyjęto do publikacji w *Quantum Information Processing*. **35 pkt**
- P. Gawron, D. Kurzyk, Ł. Paweła, *Decoherence effects in the quantum qubit flip game using Markovian approximation*. *Quantum Information Processing*, Vol. 13, Iss. 3 (2014), pp 665-682. **35 pkt**
- P. Gawron, D. Kurzyk, Z. Puchała, *A model for quantum queue*. *International Journal of Quantum Information*, Vol. 11, No. 2 (2013) 1350023. **20 pkt**

### Lista ministerialna B

- D. Kurzyk, *Introduction to Quantum Entanglement*, *Theoretical and Applied Informatics*, Vol. 24, No. 2 (2012), pp. 135–150. **7 pkt**

### Materiały konferencyjne

- W. M. Kempa and D. Kurzyk, *Transient processing analysis in a finite-buffer queueing model with setup times*, Tekst zgłoszony na konferencje: 37th International Conference on Information Systems Architecture and Technology (ISAT), 2016.
- W. M. Kempa and D. Kurzyk, *Analysis of time-dependent queue-size distribution in a finite-buffer model with generally distributed server setup times*, Tekst zgłoszony na konferencje: 5th International Symposium on Frontiers in Network Applications, Network Systems and Web Services (FedCSIS), 2016.
- W. M. Kempa and D. Kurzyk, *Queue-size distribution in a WSN node with power saving algorithm based on N-policy*, Tekst zgłoszony na konferencje: 39th International Conference on Internet in the Information Society, 2016.
- W. M. Kempa and D. Kurzyk, *Analysis of Transient Virtual Delay in a Finite-Buffer Queueing Model with Generally Distributed Setup Times*, Tekst zgłoszony na konferencje: 31st International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS), 2016.
- W. M. Kempa, D. Kurzyk, *Transient Departure Process in M/G/1/K-type Queue with Threshold Server's Waking Up*. *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*, 2015 23st International Conference on, IEEE, 2015.

- D. Kurzyk, P. Gawron, *Quantum Queuing Networks Throughput Optimisation*. Information Sciences and Systems 2014. Springer International Publishing, (2014), pp 207-216.

### Zgłoszone do publikacji

- E. Kwaśniewicz, D. Kurzyk, *Entanglement of  $0p$ -,  $1s0d$ - and  $1p0f$ - shell nucleon pairs*, zgłoszono do publikacji w *Nuclear Physics A*.
- M. Cholewa, P. Gawron, P. Głomb, D. Kurzyk, *Quantum Hidden Markov Models based on Transition Operation Matrices*, preprint arXiv:1503.08760 (2015), zgłoszono do publikacji w *Quantum Information Processing*.

### Pozostałe

- W. Hołubowski, D. Kurzyk, T. Trawiński, *A fast method for computing the inverse of symmetric block arrowhead matrices*. Applied Mathematics & Information Sciences, Vol. 2, No. 2L, (2015), pp 319-234.
- A. Katunin, D. Kurzyk, *General rules of fractals construction from polyhedra*. Journal for Geometry and Graphics, Vol.16, No. 2 (2012), pp. 129-137.

## Literatura

- [1] W. Leland and T. J. Ott. *Load-balancing heuristics and process behavior*, volume 14. ACM, 1986.
- [2] R. Cáceres, P. B. Danzig, S. Jamin, and D. J. Mitzel. Characteristics of wide-area TCP/IP conversations. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 21, pages 101–112. ACM, 1991.
- [3] V. Paxson. Empirically derived analytic models of wide-area TCP connections. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 2(4):316–336, 1994.
- [4] I. Norros. A storage model with self-similar input. *Queueing systems*, 16(3-4):387–396, 1994.
- [5] M. F. Arlitt and C. L. Williamson. Internet web servers: Workload characterization and performance implications. *IEEE/ACM Transactions on Networking (ToN)*, 5(5):631–645, 1997.
- [6] R. Maheswar and R. Jayaparvathy. Power control algorithm for wireless sensor networks using  $N$ -policy  $M/M/1$  queueing model. *Power*, 2(07):2378–2382, 2010.

- 
- [7] F. C. Jiang, D. C. Huang, C. T. Yang, and F. Y. Leu. Lifetime elongation for wireless sensor network using queue-based approaches. *The Journal of Supercomputing*, 59(3):1312–1335, 2012.
- [8] F. C. Jiang, D. C. Huang, and K. H. Wang. Design approaches for optimizing power consumption of sensor node with  $N$ -policy  $M/G/1$  queuing model. In *Proceedings of the 4th International Conference on Queueing Theory and Network Applications*, page 3. ACM, 2009.
- [9] F. C. Jiang, D. C. Huang, C. T. Yang, and K. H. Wang. Mitigation techniques for the energy hole problem in sensor networks using  $N$ -policy  $M/G/1$  queuing models. In *Frontier Computing. Theory, Technologies and Applications, 2010 IET International Conference on*, pages 281–286. IET, 2010.
- [10] V. Mancuso and S. Alouf. Analysis of power saving with continuous connectivity. *Computer Networks*, 56(10):2481–2493, 2012.
- [11] D. L. Jagerman and B. Melamed. Burstiness descriptors of traffic streams: Indices of dispersion and peakedness. In *Proceedings of the Conference on Information Sciences and Systems*, pages 24–28, 1994.
- [12] Y. Ying, R. Mazumdar, C. Rosenberg, and F. Guillemin. The burstiness behavior of regulated flows in networks. In *NETWORKING 2005. Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems*, pages 918–929. Springer, 2005.
- [13] B. D’Auria and S. I. Resnick. Data network models of burstiness. *Advances in Applied Probability*, 38(2):373–404, 2006.
- [14] D. J. Daley and R. Vesilo. Long range dependence of point processes, with queueing examples. *Stochastic Processes and Their Applications*, 70(2):265–282, 1997.
- [15] T. Karagiannis, M. Molle, and M. Faloutsos. Long-range dependence ten years of internet traffic modeling. *Internet Computing, IEEE*, 8(5):57–64, 2004.
- [16] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson. On the self-similar nature of ethernet traffic. In *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, volume 23, pages 183–193. ACM, 1993.
- [17] M. E. Crovella and A. Bestavros. Self-similarity in World Wide Web traffic: Evidence and possible causes. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(6):835–846, 1997.

- 
- [18] W. Willinger, M. S. Taqqu, R. Sherman, and D. V. Wilson. Self-similarity through high-variability: Statistical analysis of ethernet LAN traffic at the source level. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 5(1):71–86, 1997.
- [19] J. Seo, S. Lee, N. Park, H. Lee, and C. Cho. Performance analysis of sleep mode operation in IEEE 802.16e. In *Vehicular Technology Conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th*, volume 2, pages 1169–1173. IEEE, 2004.
- [20] K. Han and S. Choi. Performance analysis of sleep mode operation in IEEE 802.16e mobile broadband wireless access systems. In *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*, volume 3, pages 1141–1145. IEEE, 2006.
- [21] W. M. Kempa and I. Paprocka. Analytical solution for time-dependent queue-size behavior in the manufacturing line with finite buffer capacity and machine setup and closedown times. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 809, pages 1360–1365. Trans Tech Publ, 2015.
- [22] Q. Sun, S. Jin, and C. Chen. Energy analysis of sensor nodes in WSN based on discrete-time queueing model with a setup. In *Control and Decision Conference (CCDC), 2010 Chinese*, pages 4114–4118. IEEE, 2010.
- [23] J. Hu and T. Phung-Duc. Power consumption analysis for data centers with independent setup times and threshold controls. In *Proceedings of the International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics 2014 (ICNAAM-2014)*, volume 1648. Aip Publishing, 2015.
- [24] N. Tian and Z. G. Zhang. *Vacation queueing models: Theory and Applications*, volume 93. Springer Science & Business Media, 2006.
- [25] W. M. Kempa. The transient analysis of the queue-length distribution in the batch arrival system with  $N$ -policy, multiple vacations and setup times. In *AIP Conference Proceedings*, volume 1293, pages 235–242. AIP Publishing, 2010.
- [26] W. M. Kempa. On transient queue-size distribution in the batch arrival system with the  $N$ -policy and setup times. *Mathematical Communications*, 17(1):285–302, 2012.
- [27] A. Chydzinski. Solving finite-buffer queues with Markovian arrivals. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 35(3):13–15, 2007.
- [28] W. Kempa. The virtual waiting time for the batch arrival queueing systems. *Stochastic Analysis and Applications*, 22(5):1235–1255, 2004.

- 
- [29] W. M. Kempa. The virtual waiting time in a finite-buffer queue with a single vacation policy. In *Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications*, pages 47–60. Springer, 2012.
- [30] W. M. Kempa. On transient departure process in a finite-buffer queueing model with probabilistic packet dropping. In *Applications of Mathematics in Engineering and Economics (AMEE'14)*, volume 1631, pages 42–49. AIP Publishing, 2014.
- [31] C. Luo, X. Huang, and C. Ding. Study on the departure process of discrete-time  $Geo/G/1$  queue with randomized vacations. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2014, 2014.
- [32] Y. Tang. On the transient departure process of  $M^x/G/1$  queueing system with single server vacation. *Journal of Systems Science and Complexity*, 20(4):562–571, 2007.
- [33] W. M. Kempa. Departure process in finite-buffer queue with batch arrivals. In *Analytical and Stochastic Modeling Techniques and Applications*, pages 1–13. Springer, 2011.
- [34] A. Burnetas and A. Economou. Equilibrium customer strategies in a single server Markovian queue with setup times. *Queueing Systems*, 56(3-4):213–228, 2007.
- [35] W. Sun, P. Guo, and N. Tian. Equilibrium threshold strategies in observable queueing systems with setup/closedown times. *Central European Journal of Operations Research*, 18(3):241–268, 2010.
- [36] P. Chen, W. Zhou, and Y. Zhou. Equilibrium customer strategies in the queue with threshold policy and setup times. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015.
- [37] W. Yue, Q. Sun, and S. Jin. Performance analysis of sensor nodes in a WSN with sleep/wakeup protocol. In *Lect. Notes Oper. Res.*, volume 12, pages 370–377, 2010.
- [38] Z. Niu, X. Guo, S. Zhou, and P. R. Kumar. Characterizing energy–delay tradeoff in hyper-cellular networks with base station sleeping control. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 33(4):641–650, 2015.
- [39] W. M. Kempa. Study on time-dependent departure process in a finite-buffer queueing model with BMAP-type input stream. In *Cybernetics (CYBCONF), 2015 IEEE 2nd International Conference on*, pages 245–250. IEEE, 2015.
-

- 
- [40] W. M. Kempa, I. Paprocka, K. Kalinowski, and C. Grabowik. On departure process in a production model with cyclic working and repair periods. In *Advanced Materials Research*, volume 1036, pages 846–851. Trans Tech Publ, 2014.
- [41] W. M. Kempa, I. Paprocka, C. Grabowik, and K. Kalinowski. On effect of model parameters on departure process in a production system with failures. In *Advanced Materials Research*, volume 1036, pages 927–932. Trans Tech Publ, 2014.
- [42] W. M. Kempa and D. Kurzyk. Queue-size distribution in a WSN node with power saving algorithm based on  $N$ -policy. *Zgłoszono do publikacji*, 2016.
- [43] W. M. Kempa and D. Kurzyk. On transient queue-size distribution in a WSN node with threshold-type power saving algorithm. *Zgłoszono do publikacji*, 2016.
- [44] W. M. Kempa and D. Kurzyk. Analysis of time-dependent queue-size distribution in a finite-buffer model with generally distributed server setup times. *Zgłoszono do publikacji*, 2016.
- [45] W. M. Kempa and D. Kurzyk. Analysis of time-dependent queue-size distribution in a finite-buffer model with batched arrivals and generally distributed setup times. *Zgłoszono do publikacji*, 2016.
- [46] W. M. Kempa and D. Kurzyk. Analysis of transient virtual delay in a finite-buffer queueing model with generally distributed setup times. *Zgłoszono do publikacji*, 2016.
- [47] W. M. Kempa and D. Kurzyk. Transient departure process in  $M/G/1/K$ -type queue with threshold server’s waking up. In *Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2015 23rd International Conference on*, pages 32–36. IEEE, 2015.
- [48] W. M. Kempa and D. Kurzyk. Non-stationary departure process in a batch-arrival  $M^X/G/1/K$ -type queue with threshold policy. *Zgłoszono do publikacji*, 2016.
- [49] W. M. Kempa and D. Kurzyk. Transient processing analysis in a finite-buffer queueing model with setup times. *Zgłoszono do publikacji*, 2016.