

Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki
i Informatyki

Rafał Marjasz

Modele kolejkowe
z mechanizmem zawieszenia obsługi typu
„multiple vacation” – analiza
z wykorzystaniem SD

Streszczenie rozprawy doktorskiej
napisanej pod kierunkiem
dr hab. inż. Wojciecha Kempy, prof. PŚ

Gliwice 19 kwietnia 2023

Spis treści

Wprowadzenie	3
Cel i teza rozprawy	5
Układ pracy	6
Model kolejkowy z dyscypliną zawieszenia obsługi typu „multiple vacation”	7
Wyniki badań	9
Podsumowanie	11
Dorobek naukowy	13
Bibliografia	16

Wprowadzenie

Teoria kolejek, zwana również teorią masowej obsługi, na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat przyczyniła się do znaczącego rozwoju technologii w dziedzinie telekomunikacji, w szczególności w zakresie sieci oraz systemów komputerowych. Istotą tej teorii jest badanie zjawiska przetwarzania (obsługi) napływających do systemu teleinformatycznego zgłoszeń (pakietów). W procesie tym dochodzi do akumulacji zgłoszeń oczekujących na obsługę (czyli tworzenia kolejki zgłoszeń), zaś sama obsługa odbywa się wedle przyjętej w systemie dyscypliny (regulaminu). Postępująca informatyzacja społeczeństwa przekłada się na rosnące znaczenie tego typu systemów. Zaspokojenie popytu realizowane jest przez rozwój i upowszechnianie urządzeń oraz usług telekomunikacyjnych: począwszy od komputerów i Internetu, poprzez zyskujące na znaczeniu inteligentne urządzenia (ang. *smart device*) wykorzystujące jako medium sieci komórkowe bądź Internet, a skończywszy na mniej rozpowszechnionych, operujących w koncepcji Internetu rzeczy urządzeniach IoT (ang. *Internet of Things*) dla których medium stanowią bezprzewodowe sieci sensorowe lub Internet. Każde z wymienionych urządzeń generuje właściwy dla użytej technologii ruch sieciowy mający bezpośrednie przełożenie na proces kolejowania przesyłanych zgłoszeń.

Tematyka niniejszej rozprawy wpisuje się w nurt badań nad zagadnieniami występującymi w teorii masowej obsługi, koncentrując się na analizie systemów kolejkowych mających zastosowanie w sieciach komputerowych i telekomunikacji. W szczególności, przedmiotem rozważań ujętych w dysertacji są jednokanałowe modele kolejkowe z poissonowskim strumieniem wejściowym, skończonym rozmiarem bufora kolejki oraz dyscypliną zawieszania obsługi typu „multiple vacation”. Modele kolejkowe z ograniczoną pojemnością bufora akumulującego są przedmiotem intensywnych badań. Dzieje się tak ze względu na ich charakterystyczne właściwości, umożliwiające modelowanie procesów zachodzących np. w przełącznikach sieciowych (routerach), w których zachodzą zjawiska związane z: akumulacją pakietów w buforze urządzenia bądź ich utratą na skutek przepełnienia tegoż bufora, przetwarzaniem pakietów zgodnie z przyjętą dyscypliną, czy też opóźnieniem kolejowania wynikającym z oczekiwania pakietów w buforze. W przypadku modeli kolejkowych z ograniczeniami w dostępie do serwera pojawia się dodatkowo możliwość bardziej precyzyjnego opisu rzeczywistych syste-

mów, w których może dochodzić do tymczasowych przestoju w dostępie do urządzenia przetwarzającego pakiety. Rzeczony przestoje mogą wynikać m. in. z konieczności oszczędzania energii w urządzeniu zasilanym bateryjnie, które wobec zaistnienia odpowiednich okoliczności przechodzi z trybu pełnej gotowości w tryb zużywający mniejszą ilość energii. Przykładem takowej okoliczności jest sytuacja, w której system kolejkowy zostaje opróżniony z pakietów, wówczas urządzenie może przejść w niskoenergetyczny tryb nasłuchu i akumulacji nadchodzących w przyszłości pakietów.

Problem oszczędności energii w sieciach sensorowych został poruszony m. in. w pracach [25], [8], [16], przedstawiających różne typy modeli kolejkowych. Jak łatwo zauważyć, znakomita większość dostępnych w literaturze wyników analitycznych opracowanych dla modeli kolejkowych z ograniczeniami w dostępie do serwera dotyczy stanu ustalonego systemu. Charakterystyki stanu ustalonego ilustrują długoterminową pracę systemu, stanowiąc niezbędną podstawę do oceny efektywności ich pracy. Jednakże czasami w praktyce tranzytywna (niestacjonarna) analiza charakterystyk systemów kolejkowych jest wskazana lub wręcz konieczna. Wynika to m. in. z faktu występowania w ruchu sieciowym następujących zjawisk: samopodobieństwa (ang. *self-similarity*) – [1], [26], [41]; długookresowej zależności (ang. *long-range dependence*) – [2], [3], [43]; spiętrzenia pakietów (ang. *burstiness*) – [7], [33], [35]. Owe zjawiska mogą przyczyniać się do niemożności osiągnięcia przez system stanu ustalonego w krótkim horyzoncie czasu. Tranzytywna analiza zachowania systemów kolejkowych pozwala na monitorowanie ich pracy bezpośrednio po uruchomieniu systemu, a także w okresach przestoju i sytuacjach destabilizacji pracy serwera oraz w przypadku, gdy stabilizacja systemu trwa relatywnie długo np. wskutek nieregularnego ruchu wejściowego. Ogólna postać zaprezentowanych w pracy wyników umożliwia modelowanie systemów, w których obsługa pakietów odbywa się zgodnie z dowolnym rozkładem prawdopodobieństwa.

Cel i teza rozprawy

Cel rozprawy

Celem rozprawy jest stochastyczna analiza najważniejszych charakterystyk modeli kolejkowych z dyscypliną zawieszenia obsługi typu „multiple vacation” w stanie niestacjonarnym (tranzytywnym, w ustalonej chwili czasu t). Przedstawione w rezultaty badań dotyczą:

- *precyzyjnego modelowania ruchu sieciowego z uwzględnieniem mechanizmu zawieszenia obsługi oraz skończonego rozmiaru bufora urzędzenia kolejującego pakiety;*
- *czterech kluczowych charakterystyk modeli w stanie nieustalonym, których rozkłady prawdopodobieństwa zostały wyznaczone analitycznie w postaci jawnej z użyciem transformat Laplace’a;*
- *strumienia wejściowego uwzględniającego zarówno pojedynczy jak i grupowy napływ pakietów;*
- *numerycznej analizy funkcjonowania rozważanych modeli;*
- *wykorzystania Dynamiki Systemowej oraz metody Powella przy doborze zoptymalizowanej długości okresów przestoju występujących w rozważanym mechanizmie zawieszenia obsługi.*

Teza rozprawy

Matematyczne metody, oparte na wykorzystaniu koncepcji włożonego łańcucha Markowa, twierdzenia o prawdopodobieństwie całkowitym dla ciągłych zmiennych losowych, układów równań całkowych typu Volterry, metody potencjału, a także wybranych narzędzi i wyników analizy matematycznej oraz teorii odnowy, umożliwiają precyzyjne modelowanie zachowania się systemów kolejkowych z mechanizmem zawieszenia obsługi w stanie nieustalonym. Dynamika zmian charakterystyk rozważanych systemów kolejkowych w stanie nieustalonym jest możliwa do odwzorowania w modelu symulacyjnym zbudowanym w oparciu o metodologię Dynamiki Systemowej, a analiza tejże dynamiki w skonstruowanym modelu z jednoczesnym zastosowaniem metody Powella umożliwi dobór optymalnej długości okresów przestoju mechanizmu zawieszenia obsługi.

Układ pracy

Zawarte w rozprawie wyniki przedstawione zostały według następującego porządku. W Rozdziale 1 opisano wstępne informacje na temat systemów kolejkowych typu $M/G/1/N$, a także stosowane oznaczenia i wyniki pomocnicze. Rozdziały 2 - 5 stanowią główną część rozprawy. Prezentują wyniki uzyskane dla tranzytywnych rozkładów prawdopodobieństwa charakterystyk takich jak długość kolejki, czas do pierwszego przepełnienia bufora, opóźnienia kolejkowania oraz proces liczący obsłużone zgłoszenia w modelach typu $M/G/1/N$ z mechanizmem zawieszenia obsługi. Wyniki odnoszą się do kolejkowania prostych i złożonych procesów Poissona (co w praktyce oznacza uwzględnianie pojedynczego i grupowego napływu pakietów). Rozdział 6 opisuje zastosowanie Dynamiki Systemowej w celu symulowania zachowania się systemu $M^X/D/1/N$ z mechanizmem zawieszenia obsługi rozważanym w rozprawie w dedykowanym oprogramowaniu Vensim. Stworzony model symulacyjny umożliwia wyznaczenie optymalnej długości okresów przestoju, występujących w rozważanym mechanizmie zawieszenia obsługi. Informacje uzupełniające w postaci kodu programu symulatora zdarzeń dyskretnych, umożliwiającego symulowanie zachowania się systemów kolejkowych $M^X/G/1/N$ z dyscypliną zawieszenia obsługi, znajdują się w dodatku A w postaci dołączonego załącznika.

Model kolejkowy z dyscypliną zawieszenia obsługi typu „multiple vacation”

W rozprawie rozważamy modele kolejkowe typu $M/G/1/N$ oraz $M^X/G/1/N$, w których napływ zgłoszeń opisywany jest odpowiednio za pomocą prostego i złożonego procesu Poissona, o zadanej parametrem λ intensywności. Obsługa zgłoszeń jest zgodna z naturalną dyscypliną FIFO, a czasy obsługi poszczególnych zgłoszeń są niezależnymi zmiennymi losowymi o jednakowych rozkładach z dystrybuantą $F(\cdot)$. Maksymalna pojemność systemu (w sensie liczby zgłoszeń mogących przebywać w nim równocześnie) jest równa N ($N - 1$ miejsc w buforze i jedno miejsce dla zgłoszenia aktualnie obsługiwanego). Każdorazowo w momencie, w którym kończy się obsługa zgłoszenia, a bufor nie zawiera innych zgłoszeń, serwer rozpoczyna okres zawieszenia obsługi. Okres ten składa się z kolejnych (*multiple*) okresów przestoju (*vacation*) będących zmiennymi losowymi niezależnymi o jednakowych rozkładach z dystrybuantą $G(\cdot)$. Po zakończeniu każdego z pojedynczych okresów przestoju monitorowany jest stan bufora, a wówczas jeśli zawiera on choć jedno zakolejkowane zgłoszenie, serwer nie uruchamia kolejnego okresu przestoju. W przeciwnym wypadku inicjalizowany jest kolejny okres przestoju określony dystrybuantą $G(\cdot)$.

Jedną z pierwszych prac badawczych opisujących rozważany w dysertacji model $M/G/1/N$ z dyscypliną zawieszenia obsługi jest [23] autorstwa Lee, w której to rozkład długości kolejki jest badany przy użyciu włożonych łańcuchów Markowa. Wykorzystując technikę zmiennej uzupełniającej wyprowadzony został wzór ogólny dla rozkładu długości kolejki w stanie ustalonym, jak również wzór na prawdopodobieństwo zapełnienia bufora w tymże stanie. Poprzez stosowanie funkcji tworzących rozkładów prawdopodobieństwa otrzymano także rozkłady okresu zajętości i czasu oczekiwania. Autor dokonuje rozszerzenia badań, prezentując je w kolejnej pracy [24], w której rozważany jest model z serwerem rozpoczynającym okres zawieszenia obsługi, jeśli kolejka została opróżniona lub obsłużono m zgłoszeń w trakcie nieprzerwanej obsługi. Prezentowane w pracy charakterystyki długości

kolejki oraz okresu zajętości w stanie ustalonym są wyprowadzone również dla bufora o nieograniczonej pojemności ($N \rightarrow \infty$). Kolejny postęp w badaniach nad modelem został zaprezentowany m. in. przez Takagię w [38]. Autor wykorzystał analizę cyklu odnowy okresów zajętości serwera oraz zawieszenia przez niego obsługi do uzyskania miary przepustowości systemu i średniego czasu oczekiwania dla stanu ustalonego. Otrzymał On również transformatę Laplace'a-Stieltjesa funkcji rozkładu wirtualnego czasu oczekiwania na obsługę, poprzez zastosowanie metody zmiennych uzupełniających do łącznego rozkładu wielkości kolejki i czasu obsługi bądź jej zawieszenia. W pracy [27] analizowany jest stan nieustalony (tranzytywny) modelu $M/G^{a,b}/1$ z grupową obsługą i zgłoszeń ($a \leq i \leq b$) oraz buforem, który pozwala na zakumulowanie maksymalnie b zgłoszeń. Aby rozpocząć obsługę, wymagane jest minimum a zgłoszeń, a serwer rozpoczyna okres zawieszenia obsługi, gdy w buforze znajdzie mniej niż a zgłoszeń oczekujących. Jeśli serwer kończy okres przestoju i ponownie zastaje mniej niż a zgłoszeń oczekujących, natychmiast rozpoczyna kolejny okres, a wszystkie następujące kolejno po sobie okresy przestoju wspólnie stanowią jeden ciągły okres zawieszenia obsługi. Autorzy, korzystając z teorii procesów odnowy, wyprowadzili formuły na zależne od czasu prawdopodobieństwo, iż system w chwili t znajduje się w stanie (i, j) należącym do następującej przestrzeni stanów $S = \{(i, j); a \leq i \leq b, 0 \leq j \leq b\} \cup \{(0, j); 0 \leq j \leq b\}$.

Wyniki badań

Zaprezentowane w niniejszej rozprawie wyniki badań dotyczą tranzytywnych (niestacjonarnych) charakterystyk modeli kolejkowych z jedną stacją obsługi zgłoszeń, skończonym buforem, poissonowskim strumieniem wejściowym oraz dyscypliną zawieszenia obsługi składającą się z wielokrotnych okresów przestoju (ang. *multiple vacation*), których długości w ogólnym przypadku są zmiennymi losowymi o jednakowym rozkładzie prawdopodobieństwa. Założenie skończoności bufora jest wysoce znaczące w przypadku modelowania procesów zachodzących w sieciach komputerowych, w szczególności w będących przedmiotem zainteresowań autora sieciach sensorowych, opartych często na urządzeniach o znacząco ograniczonej mocy przetwarzania i zasobach systemowych. Uzyskane w dysertacji wyniki analityczne charakterystyk kolejkowania są podane w postaci transformat Laplace'a oraz funkcji tworzących transformat Laplace'a. W pracy uzyskano szczegółowe wyniki dla następujących charakterystyk: długości kolejki, czasu do wystąpienia pierwszego przepełnienia bufora akumulującego, czasu oczekiwania na obsługę oraz procesu liczącego obsłużone pakiety. Ponadto, wszystkie wymienione charakterystyki zostały wyznaczone zarówno dla pojedynczego jak i grupowego napływu pakietów do systemu.

Opisane w dysertacji wyniki badań uzyskano metodami analitycznymi, a zaprezentowane zostały w postaci twierdzeń, w których to wymienione w poprzednim akapicie charakterystyki są przedstawione w postaci funkcjonalów zależnych od parametrów modelu (np. rozmiaru bufora) oraz rozkładów prawdopodobieństwa (np. intensywności strumienia wejściowego, czasu obsługi zgłoszeń). Otrzymane wyniki teoretyczne są zilustrowane licznymi przykładami numerycznymi, wygenerowanymi z użyciem środowiska obliczeniowego Mathematica 12.1 [42]. Poprawność przedstawionych rozważań jest zweryfikowana metodą symulacji wykonanych w symulatorze zdarzeń dyskretnych OMNeT++ 5.6.1 [39] i zaprezentowana w podrozdziałach opisujących analizę porównawczą obliczeń numerycznych i symulacyjnych. Ponadto, z uwagi na specyfikę badanych w rozprawie modeli kolejkowych, zaproponowana została koncepcja wykorzystania metody Powella [34] przy doborze zoptymalizowanej długości okresów przestoju, występujących w rozważanym mechanizmie zawieszenia obsługi. W celu realizacji tej koncepcji, zagadnienia kolejkowania pakietów przeniesione zostały na grunt Dynamiki Systemów.

mowej, a za pomocą dedykowanego oprogramowania Vensim [40] stworzono model symulacyjny. Model ten został zweryfikowany poprzez wykonanie analizy porównawczej wyników symulacji, w zestawieniu z oczekiwanymi wartościami liczbowymi. Rezultaty przedstawionej metodyki uzyskiwania (przy użyciu symulacji) optymalnej długości okresu przestoju w rozważanych modelach kolejkowych zostały zaprezentowane na przedstawionych w pracy wykresach.

Zawarte w pracy wyniki umożliwiają uzyskanie odpowiedzi na pytania, jak zmiana długości okresów przestoju, a także zmiany intensywności wpływu, intensywności obsługi, bądź wartości początkowej liczby obecnych w systemie pakietów, wpływają na:

- długość kolejki,
- rozkład prawdopodobieństwa czasu do pierwszego przepełnienia bufora,
- wirtualny czas oczekiwania na obsługę,
- liczbę obsłużonych pakietów w określonym czasie.

Inną kwestią, którą można rozstrzygnąć na podstawie wyników badań zaprezentowanych w dysertacji, jest ustalenie, po jakim czasie od startu praca systemu stabilizuje się i jaki wpływ na tę stabilizację ma jego stan początkowy. Ponadto, możliwe jest także określenie stopnia przełożenia warunków transmisyjnych występujących w systemie na możliwość doboru oraz wynikową wartość optymalnej długości okresów przestoju mechanizmu zawieszenia obsługi.

Podsumowanie

Niniejsza rozprawa w sposób kompleksowy omawia charakterystyki długości kolejki, czasu do wystąpienia pierwszego przepełnienia bufora, opóźnienia kolejkowania oraz procesu liczącego obsłużone zgłoszenia dla modeli kolejkowych z jedną stacją obsługi zgłoszeń, skończonym buforem, poissonowskim strumieniem wejściowym i dyscypliną zawieszenia obsługi składającą się z wielokrotnych okresów przestoju, których długości w ogólnym przypadku są zmiennymi losowymi o jednakowym rozkładzie prawdopodobieństwa. Uzyskane wyniki dotyczą kolejkowania zarówno prostych jak i złożonych procesów Poissona i zostały podane w postaci transformat Laplace'a oraz funkcji tworzących transformat Laplace'a. Otrzymane zostały za pomocą metod analitycznych, które z powodzeniem można wykorzystać do wyznaczenia wielu innych charakterystyk systemów kolejkowych, m. in. współczynnika strat pakietów, okresu przepełnienia bufora, liczby utraconych w okresie przepełnienia zgłoszeń. Stosowana metodologia umożliwia otrzymanie tranzytywnego opisu najważniejszych charakterystyk w zwartej postaci, która przekłada się na redukcję czasu niezbędnego na ich implementację w kodzie. Ponadto wykazano, iż mimo skomplikowanej struktury statystycznego opisu ruchu sieciowego zamodelowanego z wykorzystaniem użytej metodologii, możliwe jest uzyskanie wyników numerycznych na przeciętnej klasie komputerze osobistym. W sposób oczywisty, dla przypadku systemów kolejkowych o dużych buforach kolejek oraz skomplikowanych rozkładach prawdopodobieństwa opisujących okresy zawieszenia obsługi lub czasy obsługi zgłoszeń, obliczenia numeryczne wymagać będą odpowiednio większych zasobów obliczeniowych.

Zawarte w dysertacji rezultaty dowodzą możliwości uzyskania matematycznego, zwartego opisu zachowania systemów kolejkowych z dyscypliną zawieszenia obsługi, co daje możliwość efektywnego modelowania tego typu systemów w stanie nieustalonym. Rezultaty rozważań teoretycznych uzupełniono o liczne przykłady numeryczne, prezentujące zachowanie poszczególnych charakterystyk systemów kolejkowych w kontekście ruchu sieciowego. Z praktycznego punktu widzenia, osiągnięte w rozprawie wyniki badań umożliwiają ocenę wydajności oraz zapewnienie jakości w różnego rodzaju usługach telekomunikacyjnych, których funkcjonowanie oparte jest na teorii kolejek. W szczególności, dzięki zastosowaniu metodologii Dynamiki Systemowej z

Podsumowanie

jednoczesnym zastosowaniem metody Powella, możliwy jest dobór optymalnej długości okresów przestoju mechanizmu zawieszenia obsługi. Poza tym, w pracy przytoczono dwa algorytmy obliczeniowe numerycznego odwracania transformaty Laplace'a i funkcji tworzących transformat, umożliwiając wgląd w praktyczność ich stosowania oraz osiągnięte rezultaty.

Dorobek naukowy

Publikacje w czasopismach

- K. Grochla, A. Strzoda, R. Marjasz, P. Głomb, K. Książek, and Z. Łaskarzewski. Energy-aware algorithm for assignment of relays in LP WAN. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 18(4), nov 2022; **140 pkt**
- A. Strzoda, R. Marjasz, and K. Grochla. LoRa positioning in verification of location data's credibility. *Infocommunications Journal*, 14(4):56–61, 2022; **20 pkt**
- W. M. Kempa, K. Książek, and R. Marjasz. On time-dependent queue-size distribution in a model with finite buffer capacity and deterministic multiple vacations with applications to LTE DRX mechanism modeling. *IEEE Access*, 9:148374–148383, 2021; **100 pkt**
- W. M. Kempa and R. Marjasz. Study on transient queue-size distribution in the finite-buffer model with batch arrivals and multiple vacation policy. *Entropy*, 23(11), 2021; **100 pkt**
- M. Gorawski, K. Grochla, R. Marjasz, and A. Frankiewicz. Energy minimization algorithm for estimation of clock skew and reception window selection in wireless networks. *Sensors*, 21(5):1768, 2021; **100 pkt**
- W. M. Kempa and R. Marjasz. Distribution of the time to buffer overflow in the M/G/1/N-type queueing model with batch arrivals and multiple vacation policy. *Journal of the Operational Research Society*, 71(3):447–455, 2020; **70 pkt**
- E. Kasperska, A. Kasperski, R. Marjasz, and E. Mateja-Losa. Some simulation and optimization experiments on prey-predator model. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, Politechnika Śląska*, (119):111–126, 2018; **11 pkt**
- E. Kasperska, T. Bajon, and R. Marjasz. Interactive gaming as a support for system dynamics learning with the use of vensim. *Zeszyty Na-*

ukowe. Matematyka Stosowana/Politechnika Śląska, (5):99–110, 2015; **4 pkt**

- E. Kasperska and R. Marjasz. World model simulation—the example of macro forecasting for humanity development. *Studia Ekonomiczne*, (234):68–79, 2015; **10 pkt**
- R. Marjasz. Finding the optimal strategy for employment in conjunction to the mechanism of promotion within the workforce—simulation in Vensim software. *Studia Ekonomiczne*, (234):101–113, 2015; **10 pkt**
- E. Kasperska, E. Mateja-Losa, T. Bajon, and R. Marjasz. "Did napoleon have to lose the Waterloo battle?": Some sensitivity analysis and optimization experiments using simulation by Vensim. *Studia Ekonomiczne*, (188):97–118, 2014; **10 pkt**
- R. Marjasz. Wspomaganie logistyki produkcji w firmie z użyciem narzędzi symulacyjnych. *Prace Naukowe/Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach*, pages 58–70, 2014;
- E. Kasperska, E. Mateja-Losa, and R. Marjasz. Sensitivity analysis and optimization for selected supply chain management issues in the company—using system dynamics and Vensim. *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*, pages 29–44, 2013; **14 pkt**

Materiały konferencyjne

- A. Strzoda, R. Marjasz, and K. Grochla. How accurate is LoRa positioning in realistic conditions? In *Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications (part of ACM MSWiM 2022 Conference)*, pages 31–35, 2022; **140 pkt**
- R. Marjasz, K. Polys, A. Strzoda, and K. Grochla. Improving delivery ratio in LoRa network. In *Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access (part of ACM MSWiM 2021 Conference)*, MobiWac '21, page 141–146, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery; **140 pkt**
- R. Marjasz, A. Strzoda, K. Polys, and K. Grochla. Mitigation of LoRa interferences via dynamic channel weights. In *Proceedings of the 35th annual European Simulation and Modelling Conference ESM 2021*, pages 150–154. EUROSIS, 2021; **70 pkt**
- R. Marjasz, K. Grochla, A. Strzoda, and Z. Laskarzewski. Simulation analysis of packet delivery probability in LoRa networks. In Piotr Gaj, Michał Sawicki, and Andrzej Kwiecień, editors, *Computer Networks:*

26th International Conference, CN 2019, Kamień Śląski, Poland, June 25–27, 2019, Proceedings 26, pages 86–98, Cham, 2019. Springer International Publishing; **20 pkt**

- K. Grochla, R. Marjasz, K. Połys, and A. Strzoda. Kolizje pakietów w sieciach LoRa w zastosowaniach smart city. In *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki, 26-28.06.2019, Wrocław, Polska*. Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 2019;
- W. M. Kempa and R. Marjasz. Transient queueing delay in a finite-buffer batch-arrival model with constant repeated vacations. In *Computer Networks: 25th International Conference, CN 2018, Gliwice, Poland, June 19-22, 2018, Proceedings 25*, pages 311–320. Springer, 2018; **20 pkt**
- W. M. Kempa and R. Marjasz. Departure counting process in a wireless network node with sleep mode modelled via repeated vacations. In Robertas Damaševičius and Vilma Mikašytė, editors, *Information and Software Technologies*, pages 395–407, Cham, 2017. Springer International Publishing; **20 pkt**
- E. Kasperska, A. Kasperski, T. Bajon, and R. Marjasz. Visualization for learning in organization based on the possibilities of Vensim. In *Proceedings of Knowledge Management Conference*, pages 21–34, 2014;

Rozdziały w monografii

- W. M. Kempa and R. Marjasz. Distribution of the time to buffer overflow in the single-server queueing model with multiple vacation policy. *Selected Problems on Experimental Mathematics*, pages 113–127, 2017; **20 pkt**
- E. Kasperska, A. Kasperski, T. Bajon, and R. Marjasz. Modeling and simulation of ecosystems on the base of prey-predator model of system dynamics type sensitivity analysis, calibration and gaming. *Dynamical systems. Mathematical and numerical approaches*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, pages 267–278, 2015;

Bibliografia

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] A. Erramilli, O. Narayan, and W. Willinger. Experimental queueing analysis with long-range dependent packet traffic. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 4(2):209–223, 1996.
- [4] M. Gorawski, K. Grochla, R. Marjasz, and A. Frankiewicz. Energy minimization algorithm for estimation of clock skew and reception window selection in wireless networks. *Sensors*, 21(5):1768, 2021.
- [5] K. Grochla, R. Marjasz, K. Polys, and A. Strzoda. Kolizje pakietów w sieciach LoRa w zastosowaniach smart city. In *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki, 26-28.06.2019, Wrocław, Polska*. Przegład Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne, 2019.
- [6] K. Grochla, A. Strzoda, R. Marjasz, P. Głomb, K. Książek, and Z. Łaskarzewski. Energy-aware algorithm for assignment of relays in LP WAN. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 18(4), nov 2022.
- [7] D. 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, 03 1994.
- [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 queueing model. In *Proceedings of the 4th International Conference on Queueing Theory and Network Applications*, QTNA '09, New York, NY, USA, 2009. Association for Computing Machinery.
- [9] E. Kasperska, T. Bajon, and R. Marjasz. Interactive gaming as a support for system dynamics learning with the use of vensim. *Zeszyty Naukowe. Matematyka Stosowana/Politechnika Śląska*, (5):99–110, 2015.

- [10] E. Kasperska, A. Kasperski, T. Bajon, and R. Marjasz. Visualization for learning in organization based on the possibilities of Vensim. In *Proceedings of Knowledge Management Conference*, pages 21–34, 2014.
- [11] E. Kasperska, A. Kasperski, T. Bajon, and R. Marjasz. Modeling and simulation of ecosystems on the base of prey-predator model of system dynamics type sensitivity analysis, calibration and gaming. *Dynamical systems. Mathematical and numerical approaches. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej*, pages 267–278, 2015.
- [12] E. Kasperska, A. Kasperski, R. Marjasz, and E. Mateja-Losa. Some simulation and optimization experiments on prey-predator model. *Zeszyty Naukowe. Organizacja i Zarządzanie, Politechnika Śląska*, (119):111–126, 2018.
- [13] E. Kasperska and R. Marjasz. World model simulation—the example of macro forecasting for humanity development. *Studia Ekonomiczne*, (234):68–79, 2015.
- [14] E. Kasperska, E. Mateja-Losa, T. Bajon, and R. Marjasz. "Did napoleon have to lose the Waterloo battle?": Some sensitivity analysis and optimization experiments using simulation by Vensim. *Studia Ekonomiczne*, (188):97–118, 2014.
- [15] E. Kasperska, E. Mateja-Losa, and R. Marjasz. Sensitivity analysis and optimization for selected supply chain management issues in the company—using system dynamics and Vensim. *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*, pages 29–44, 2013.
- [16] W. M. Kempa. Analytical model of a wireless sensor network (WSN) node operation with a modified threshold-type energy saving mechanism. *Sensors*, 19(14), 2019.
- [17] W. M. Kempa, K. Książek, and R. Marjasz. On time-dependent queue-size distribution in a model with finite buffer capacity and deterministic multiple vacations with applications to LTE DRX mechanism modeling. *IEEE Access*, 9:148374–148383, 2021.
- [18] W. M. Kempa and R. Marjasz. Departure counting process in a wireless network node with sleep mode modelled via repeated vacations. In Robertas Damaševičius and Vilma Mikašytė, editors, *Information and Software Technologies*, pages 395–407, Cham, 2017. Springer International Publishing.
- [19] W. M. Kempa and R. Marjasz. Distribution of the time to buffer overflow in the single-server queueing model with multiple vacation policy. *Selected Problems on Experimental Mathematics*, pages 113–127, 2017.

- [20] W. M. Kempa and R. Marjasz. Transient queueing delay in a finite-buffer batch-arrival model with constant repeated vacations. In *Computer Networks: 25th International Conference, CN 2018, Gliwice, Poland, June 19-22, 2018, Proceedings 25*, pages 311–320. Springer, 2018.
- [21] W. M. Kempa and R. Marjasz. Distribution of the time to buffer overflow in the M/G/1/N-type queueing model with batch arrivals and multiple vacation policy. *Journal of the Operational Research Society*, 71(3):447–455, 2020.
- [22] W. M. Kempa and R. Marjasz. Study on transient queue-size distribution in the finite-buffer model with batch arrivals and multiple vacation policy. *Entropy*, 23(11), 2021.
- [23] T. T. Lee. M/G/1/N queue with vacation time and exhaustive service discipline. *Operations Research*, 32(4):774–784, 1984.
- [24] T. T. Lee. M/G/1/N queue with vacation time and limited service discipline. *Performance Evaluation*, 9(3):181–190, 1989.
- [25] J. Li, H. Y. Zhou, D. C. Zuo, K. M. Hou, H. P. Xie, and P. Zhou. Energy consumption evaluation for wireless sensor network nodes based on queueing petri net. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 10(4):262848, 2014.
- [26] Q. Liang. Ad hoc wireless network traffic-self-similarity and forecasting. *IEEE Communications Letters*, 6(7):297–299, 2002.
- [27] J.J. Machuveettil and T.P. Madhusoodanan. Transient solution for a finite capacity M/G^{a,b}/1 queueing system with vacations to the server. *Queueing systems*, 2:381–386, 1987.
- [28] R. Marjasz. Wspomaganie logistyki produkcji w firmie z użyciem narzędzi symulacyjnych. *Prace Naukowe/Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach*, pages 58–70, 2014.
- [29] R. Marjasz. Finding the optimal strategy for employment in conjunction to the mechanism of promotion within the workforce—simulation in Vensim software. *Studia Ekonomiczne*, (234):101–113, 2015.
- [30] R. Marjasz, K. Grochla, A. Strzoda, and Z. Laskarzewski. Simulation analysis of packet delivery probability in LoRa networks. In Piotr Gaj, Michał Sawicki, and Andrzej Kwiecień, editors, *Computer Networks: 26th International Conference, CN 2019, Kamień Śląski, Poland, June 25–27, 2019, Proceedings 26*, pages 86–98, Cham, 2019. Springer International Publishing.

- [31] R. Marjasz, K. Polys, A. Strzoda, and K. Grochla. Improving delivery ratio in LoRa network. In *Proceedings of the 19th ACM International Symposium on Mobility Management and Wireless Access (part of ACM MSWiM 2021 Conference)*, MobiWac '21, page 141–146, New York, NY, USA, 2021. Association for Computing Machinery.
- [32] R. Marjasz, A. Strzoda, K. Polys, and K. Grochla. Mitigation of LoRa interferences via dynamic channel weights. In *Proceedings of the 35th annual European Simulation and Modelling Conference ESM 2021*), pages 150–154. EUROSIS, 2021.
- [33] S. Munir, S. and Lin, E. Hoque, S. M. Nirjon, J. A. Stankovic, and K. Whitehouse. Addressing burstiness for reliable communication and latency bound generation in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks, IPSN '10*, page 303–314, New York, NY, USA, 2010. Association for Computing Machinery.
- [34] M. J. D. Powell. An efficient method for finding the minimum of a function of several variables without calculating derivatives. *The Computer Journal*, 7(2):155–162, 01 1964.
- [35] D. Starobinski and M. Sidi. Stochastically bounded burstiness for communication networks. In *IEEE INFOCOM '99. Conference on Computer Communications. Proceedings. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. The Future is Now (Cat. No.99CH36320)*, volume 1, pages 36–42 vol.1, 1999.
- [36] A. Strzoda, R. Marjasz, and K. Grochla. How accurate is LoRa positioning in realistic conditions? In *Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Design and Analysis of Intelligent Vehicular Networks and Applications (part of ACM MSWiM 2022 Conference)*, pages 31–35, 2022.
- [37] A. Strzoda, R. Marjasz, and K. Grochla. LoRa positioning in verification of location data's credibility. *Infocommunications Journal*, 14(4):56–61, 2022.
- [38] H. Takagi. Analysis of an M/G/1//N queue with multiple server vacations, and its application to a polling model. *Journal of the Operations Research Society of Japan*, 35(3):300–315, 1992.
- [39] A. Varga. OMNeT++ discrete event simulator. Available at <https://omnetpp.org/>, version 6.0.1, data dostępu: 15.12.2022.
- [40] Systems Ventana. Vensim simulation software. Available at <https://vensim.com/>, data dostępu: 05.01.2023.

Bibliografia

- [41] Y. Wang, W. Wang, S. Cao, S. Li, L. Xie, and B. Ding. Self-similarity superresolution for resource-constrained image sensor node in wireless sensor networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014:1–10, 01 2014.
- [42] S. Wolfram and The Wolfram Centre. Mathematica. Available at <https://www.wolfram.com/mathematica/new-in-12/>, version 12.1, data dostępu: 30.11.2022.
- [43] S. Zheng and John S. Baras. Multi-scale analysis of long range dependent traffic for anomaly detection in wireless sensor networks. In *2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, pages 4060–4065, 2011.