

Politechnika Śląska
Wydział Automatyki, Elektroniki
i Informatyki

mgr inż. Dariusz Marek

Aktywne zarządzanie pakietami w węźle
komunikacyjnym z wykorzystaniem
kontrolera PID niecałkowitego rzędu

Rozprawa doktorska napisana pod kierunkiem
dr hab. inż. Adama Domańskiego, Prof. PŚ

Gliwice 2022

Spis treści

Lista publikacji zawartych w rozprawie doktorskiej	2
Pozostałe publikacje	3
1 Wstęp	6
2 Opis przedstawionych publikacji	9
2.1 Publikacja 1: GPU accelerated non-integer order $PI^\alpha D^\beta$ controller used as AQM mechanism	9
2.2 Publikacja 2: Combined diffusion approximation - simulation model of AQMs transient behaviour	12
2.3 Publikacja 3: Diffusion approximation model of TCP NewReno congestion control mechanism	14
2.4 Publikacja 4: Diffusion Model of a Non-Integer Order PI^γ Controller with TCP/UDP Streams	16
2.5 Publikacja 5: Approximation Models for the Evaluation of TCP/AQM Networks	19
3 Podsumowanie	23
Bibliografia	24

Lista publikacji zawartych w rozprawie doktorskiej

1. Domański, A.; Domańska, J.; Czachórski, T.; Klamka, J.; Marek, D.; Szyguła, J. GPU accelerated non-integer order $PI^\alpha D^\beta$ controller used as AQM mechanism. 25th International Conference on Computer Networks (CN 2018), Communications in Computer and Information Science, Springer International Publishing, vol. 860, s. 286-299, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92459-5_23.
2. Marek, D.; Domański, A.; Domańska, J.; Czachórski T.; Klamka J.; Szyguła, J. Combined diffusion approximation - simulation model of AQMs transient behaviour. Computer Communications 2021, vol. 166, s. 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2020.11.014>.
3. Domański, A.; Domańska, J.; Czachórski, T.; Klamka, J.; Szyguła, J.; Marek, D. Diffusion approximation model of TCP NewReno congestion control mechanism. Conference on Modelling Methods in Computer Systems, Networks and Bioinformatics, 14-15 October 2019, Paris. Springer Nature Computer Science, vol. 1 (43), <https://doi.org/10.1007/s42979-019-0032-x>.
4. Marek, D.; Domański, A.; Domańska, J.; Szyguła, J.; Czachórski, T.; Klamka, J. Diffusion Model of a Non-Integer Order PI^γ Controller with TCP/UDP Streams. Entropy 2021, vol. 23, 619. <https://doi.org/10.3390/e23050619>.
5. Marek, D.; Domański, A.; Domańska, Szyguła, J.; Czachórski T.; Klamka J.; Filus, K. Approximation Models for the Evaluation of TCP/AQM Networks. Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences, vol. 70(4), 2022. <https://doi.org/10.24425/bpasts.2022.141986>.

Pozostałe publikacje

1. Domański, A.; Domańska, J.; Czachórski, T.; Klamka, J.; Marek, D.; Szyguła, J. The Influence of the Traffic Self-similarity on the Choice of the Non-integer Order PI^α Controller Parameters. 32nd International Symposium on Computer and Information Sciences (ISCIS), Communications in Computer and Information Science, Springer International Publishing, vol. 935, s. 76-83, 2018. https://doi.org/10.1007/978-3-030-00840-6_9.
2. Domański, A.; Domańska, J.; Czachórski, T.; Klamka, J.; Marek, D.; Szyguła, J. AQM mechanism with the dropping packet function based on the answer of several PI^α controllers. 26th International Conference on Computer Networks (CN 2019), Communications in Computer and Information Science, Springer International Publishing, vol. 1039, s. 400-412, 2019. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21952-9_29.
3. Szyguła, J.; Domański, A.; Domańska, J.; Czachórski, T.; Marek, D.; Klamka, J. AQM mechanism with neuron tuning parameters. 12th Asian Conference on Intelligent Information and Database Systems (ACIIDS 2020). Lecture Notes in Artificial Intelligence, vol. 12034, s. 299-311. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42058-1_25.
4. Remiorz, L.; Czajkowski, A.; Pawlak, S.; Remiorz, E.; Szyguła, J.; Drabik, G.; Marek, D.; Antemijczuk, O.; Paduch, J.; Baron, G.; Paszkuta, M. The concept of an interactive shower panel in terms of the assumptions of Industry 4.0. Contemporary problems of power engineering and environmental protection 2020.
5. Czachórski, T.; Gelenbe, E.; Kuaban, G. S.; Marek, D. Transient behaviour of a network router. 43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing. TSP. Milan, Italy, July 7-9 2020, <https://doi.org/10.1109/TSP49548.2020.9163477>.

6. Czachórski, T.; Gelenbe, E.; Kuaban, G. S.; Marek, D. Time dependent diffusion model for security driven software defined networks, The Second International Workshop on Stochastic Modeling and Applied Research of Technology (SMARTY), Petrozavodsk, Russian Federation, 16-20 August 2020, CEUR Workshop, vol. 2792, Proceedings, s.38-56, 2020.
7. Czachórski, T.; Gelenbe, E.; Marek, D. Software Defined Network Dynamics via Diffusions. 28th International Symposium on Modelling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASSCOTS), Nice, France, 17-19 November 2020. Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), vol. 12527, s. 29-47, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68110-4_2.
8. Domański, A.; Domańska, J.; Czachórski, T.; Klamka, J.; Szyguła, J.; Marek, D. The IoT gateway with active queue management. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 31 (1), s. 165-178, 2021. <https://doi.org/10.34768/amcs-2021-0012>.
9. Szyguła, J.; Domański, A.; Domańska, J.; Marek, D.; Filus, K.; Mendla, S. Supervised Learning of Neural Networks for Active Queue Management in the Internet. Sensors 2021, vol. 21, 4979. <https://doi.org/10.3390/s21154979>.
10. Czajkowski, A.; Remiorz, L.; Pawlak, S.; Remiorz, E.; Szyguła, J.; Marek, D.; Paszkuta, M.; Drabik, G.; Baron, G.; Paduch, J.; Antemijczuk, O. Global Water Crisis: Concept of a New Interactive Shower Panel Based on IoT and Cloud Computing for Rational Water Consumption. Appl. Sci. 2021, 11, 4081, <https://doi.org/10.3390/app11094081>.
11. Czachórski, T.; Gelenbe, E.; Kuaban, G.S.; Marek, D. Time-Dependent Performance of a Multi-Hop Software Defined Network. Appl. Sci. 2021, vol. 11, 2469. <https://doi.org/10.3390/app11062469>.
12. Gelenbe, E.; Nakıp, M.; Marek, D.; Czachórski, T. Diffusion Analysis Improves Scalability of IoT Networks to Mitigate the Massive Access Problem. 29th International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS), s. 1-8. <https://doi.org/10.1109/MASCOTS53633.2021.9614289>.

13. Gelenbe, E.; Nakıp, M.; Marek, D.; Czachórski, T. Mitigating the Massive Access Problem in the Internet of Things. 2nd International Symposium on Security in Computer and Information Sciences, EuroCybersec. Security in Computer and Information Sciences, Springer International Publishing, s. 118 - 132. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09357-9_10
14. Czachórski, T.; Gelenbe, E.; Kuaban, G. S.; Marek, D. Optimizing Energy Usage for an Electric Drone. 2nd International Symposium on Security in Computer and Information Sciences, EuroCybersec. Security in Computer and Information Sciences, Springer International Publishing, s. 61 - 75, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09357-9_6.
15. Marek, D.; Szyguła, J; Domański, A.; Domańska, J.; Filus, K.; Szczygieł, M. Adaptive Hurst-Sensitive Active Queue Management. Entropy 2022, vol. 24(3), 418. <https://doi.org/10.3390/e24030418>.

Rozdział 1

Wstęp

Problemy związane z zatłoczeniem są często spotykane w sieciach komunikacyjnych. Routery sieciowe przesyłają pakiety za pomocą łączy o ograniczonej przepustowości. Jeżeli liczba przychodzących pakietów przekracza maksymalną pojemność łącza, bufor w węzłach mogą się przepełnić.

Zgodnie ze statycznymi zasadami zarządzania kolejką, pakiety podlegają usunięciu dopiero po przekroczeniu maksymalnego poziomu zapelnienia kolejki w buforze [1]. Jednym ze sposobów usuwania nadmiarowych pakietów z kolejki jest podejście oparte o prawdopodobieństwo odrzucenia pakietu. Wyraża się je za pomocą funkcji zależnej od długości kolejki. Reguły aktywnego zarządzania kolejką (ang. Active Queue Management) polegają na nieustannym monitorowaniu stopnia zapelnienia bufora i wcześniejszym przewencyjnym usuwaniu pakietów z kolejki. Prawdopodobieństwo odrzucenia pakietu zależne jest od wartości średniej kroczącej zajętości kolejki, która wyliczana jest na podstawie aktualnego rozmiaru kolejki oraz średniej obliczonej w poprzednim slotcie [1]. Najstarszym i najbardziej rozpowszechnionym algorytmem tego typu jest mechanizm Random Early Detection (RED) [2]. W przypadku tego algorytmu funkcja odrzucania pakietów jest funkcją liniową. W ciągu ostatnich lat powstały prace, które oceniały skuteczność mechanizmu RED oraz postulowały wprowadzenie wielu zmian do tego algorytmu. Jednym z podstawowych problemów w tego typu rozwiązaniach jest prawidłowy dobór parametrów mechanizmów AQM. Zagadnienie to nie jest sprawą oczywistą. Omówienie badań związanych z doбором parametrów omówiono w artykule [3]. Natomiast w pracy [4] określono dokładne warunki, dla których system TCP/RED staje się stabilny pod względem średniej długości kolejki. W pracy tej zwrócono również uwagę, że wraz ze wzrostem przepustowości łącza, a także zmniejszeniem liczby sesji TCP wydajność mechanizmu RED

wyraźnie maleje. Kolejne znane modyfikacje polegają na zmianie sposobu kształtowania funkcji prawdopodobieństwa odrzucenia pakietu. Jednym z takich rozwiązań jest mechanizm Adaptive Random Early Detection (ARED) [5]. Głównym celem badań było przedstawienie rozwiązania, które dostosuje współczynniki mechanizmu, w szczególności wartość funkcji prawdopodobieństwa odrzucenia pakietu, w zależności od aktualnie występujących parametrów transmisji. W tym celu wprowadzono dwa dodatkowe współczynniki, które umożliwiają modyfikację maksymalnego prawdopodobieństwa utraty pakietów. Innym rozwiązaniem jest mechanizm Double Slope RED (DSRED) [6]. W tym przypadku funkcja prawdopodobieństwa odrzucenia pakietu oparta jest o dwie różne proste. Po przekroczeniu ustalonego progu zajętości kolejki, funkcja ta staje się o wiele bardziej nachylna, co skutkuje znacznym wzrostem liczby odrzucanych pakietów. Inny sposób kształtowania funkcji odrzucenia pakietów zaprezentowano w pracy [7], gdzie po raz pierwszy zaproponowano wykorzystanie do tego celu funkcji kwadratowej, w oparciu o którą stworzono mechanizm Non Linear RED (NLRED). Natomiast w następnych modyfikacjach funkcje te powiązane zostały już z krzywymi wielomianowymi [8].

Tematem niniejszej rozprawy doktorskiej jest zastosowanie koncepcji obliczania prawdopodobieństwa odrzucania pakietów, w oparciu o wykorzystanie kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitych rzędów. Odpowiedź kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ traktowana jest w tym przypadku jako funkcja prawdopodobieństwa odrzucenia pakietów. Przeprowadzone badania służą ocenie efektywności zaproponowanego rozwiązania, w porównaniu do już istniejących i już przebadanych mechanizmów. W czasie badań analizowane były takie parametry transmisji jak średnia długość kolejki, liczba odrzuconych pakietów oraz średni czas oczekiwania pakietu w buforze transmisyjnym. Szczegółnej analizie poddany został także wpływ parametrów kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitego rzędu na uzyskiwane rezultaty.

Prezentowane w tej pracy wyniki wykorzystują metody symulacyjne oraz metody analityczne. Modele symulacyjne [9] stosowane są zwłaszcza przy projektowaniu urządzeń sieciowych oraz poprawie ich wydajności i niezawodności. Umożliwiają one przeprowadzenie szczegółowej analizy wydajności sieci komputerowej. Narzędzia te są również przydatne do analizy zachowania pakietów [10].

W niniejszej rozprawie oprócz modeli symulacyjnych wykorzystano również dwie metody analityczne. Aproksymacja Fluid-Flow jest klasyczną metodą stosowaną do oceny współpracy mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką z protokołem TCP [11]. Model ten ignoruje wpływ zależności czasowych i pozwala uzyskać tylko wartości średnie takich parametrów transmisji, jak np. zajętość ko-

lejkę [11]. W niniejszej pracy wykorzystano również model oparty o aproksymację dyfuzyjną [12], który w porównaniu do metody aproksymacji Fluid-Flow dostarcza bardziej szczegółowe informacje. Aproksymacja dyfuzyjna pozwala na uzyskanie informacji o rozkładzie kolejki oraz umożliwia rozpatrywanie dwóch parametrów ruchu sieciowego: natężenia i wariancji. Powala to na lepsze dopasowanie modeli do rzeczywistego ruchu sieciowego. Obie metody pozwalają na analizę zachowania nie tylko w pojedynczych węzłach, natomiast aproksymacja dyfuzyjna pozwala na rozpatrywanie bardziej złożonych konfiguracji sieci. Wyniki przedstawione w tej pracy pokazują zgodność rezultatów uzyskanych metodami analitycznymi i symulacyjnymi. Dodatkowo modele symulacyjne pozwoliły na uzyskanie pewnych rezultatów czasowych, w tym średniego czasu pobytu pakietu w kolejce. Metody analityczne pozwoliły natomiast otrzymać rezultaty, które byłyby trudno osiągalne w przypadku stosowania jedynie metod symulacyjnych [13].

Obydwa modele pozwalają na weryfikację średniej długości kolejki oraz liczby odrzuconych pakietów. Uzyskanie odpowiedzi od kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitego rzędu wiąże się z obliczeniami o dużej złożoności, tj. wykonaniem operacji całkowania i różniczkowania niecałkowitych rzędów. W związku z tym, w celu przeprowadzenia badań mających umożliwić przyspieszenie czasu obliczeń odpowiedzi kontrolera $PI^\alpha D^\beta$, w ramach pracy zaproponowano implementację tego rozwiązania w strukturach GPU.

Głównym celem pracy jest ocena zastosowania koncepcji mechanizmu aktywnego zarządzania pakietami AQM, w oparciu o kontroler $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitych rzędów do zarządzania ruchem pakietów w węzle sieciowym. W związku z tym, tezę niniejszej rozprawy zdefiniowano w sposób następujący:

Teza 1. *Oparcie mechanizmu aktywnego zarządzania kolejką (AQM) o kontroler $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitych rzędów może pozwolić na zmniejszenie średniej zajętości kolejki, a przez to na zwiększenie przepustowości transmisji danych w sieci Internet.*

Rozdział 2

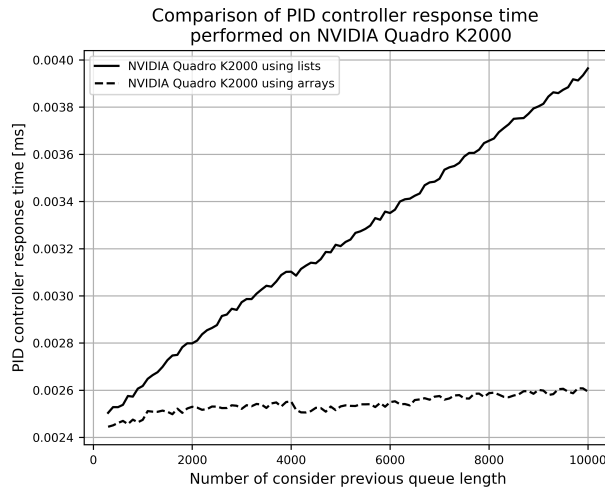
Opis przedstawionych publikacji

W rozdziale tym zawarto zbiór pięciu publikacji naukowych, które przedstawiają szczegółowy opis zaproponowanych modeli oraz przeprowadzonych eksperymentów badawczych zrealizowanych w ramach niniejszej dysertacji.

2.1 Publikacja 1: GPU accelerated non-integer order $PI^\alpha D^\beta$ controller used as AQM mechanism

Celem pracy "GPU accelerated non-integer order $PI^\alpha D^\beta$ controller used as AQM mechanism" było przyspieszenie czasu obliczeń kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ z wykorzystaniem struktur GPU oraz technologii CUDA. Zgodnie z moją najlepszą wiedzą, w chwili prowadzenia niniejszych badań nie istniały analizy implementacji mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką w oparciu o obliczenia przeprowadzane w strukturach GPU. W ramach prac zaimplementowano kontroler $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitego rzędu z wykorzystaniem różnych platform sprzętowych. W trakcie prac badawczych skupiono się na analizie czasu potrzebnego na przesył danych do struktur GPU oraz wpływie liczby elementów historii zajętości kolejki na czas potrzebny na uzyskanie odpowiedzi. Wykorzystanie struktur GPU wiąże się również z dodatkowymi opóźnieniami związanymi z przesyłaniem danych między jednostką CPU, a procesorem graficznym GPU. W trakcie badań ustalono, że czas ten wynosi około 12% całkowitego czasu obliczeń. Ponadto dane przesyłane do struktur GPU muszą posiadać postać tablicy. W związku z tym przeprowadzenie jakiegokolwiek konwersji dodatkowo wpływa na czas odpowiedzi kontrolera. Na wykresie 2.1 przedstawiono kontroler $PI^\alpha D^\beta$ zaimplementowany w strukturach GPU oraz wpływ zastosowania list oraz tablic, na czas odpowiedzi mechanizmu

AQM. Wyniki przeprowadzonych prac badawczych dowodzą, że wielkość prze-



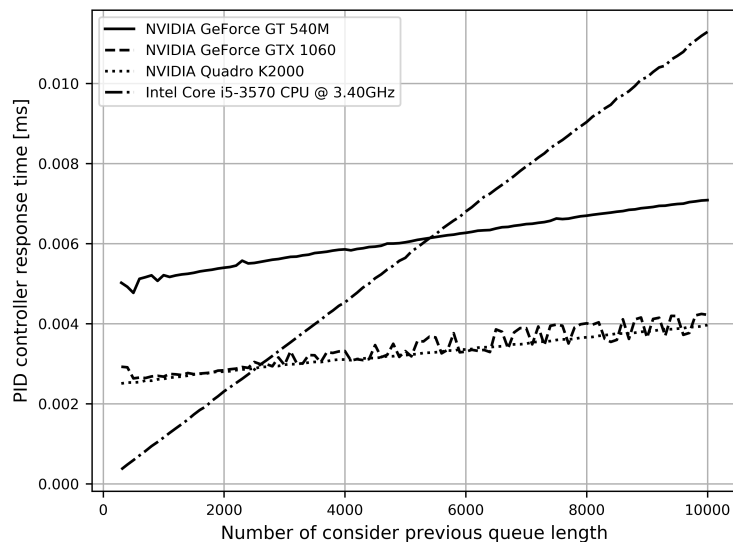
Rysunek 2.1: Porównanie czasu odpowiedzi kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ w przypadku implementacji w strukturach GPU, opartej o listy oraz tablice.

syłanych danych nie ma znaczącego wpływu w przypadku implementacji opartej o tablice.

Na wykresie 2.2 przedstawiono natomiast porównanie czasu odpowiedzi kontrolera niecałkowitego rzędu $PI^\alpha D^\beta$, w przypadku wykorzystania struktur GPU, CPU, a także zmiennej liczby elementów historii zajętości kolejki uwzględnianych w obliczeniach.

Uzyskane rezultaty wskazują, że czas odpowiedzi kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ w przypadku struktur GPU nie wzrasta tak gwałtownie wraz ze wzrostem liczby elementów historii zajętości kolejki, jak w przypadku obliczeń opartych jedynie o jednostkę procesora. Ponadto wyniki te dowodzą, że implementacja w strukturach GPU pozwala zoptymalizować pracę kontrolera, zwłaszcza wtedy, gdy rozmiar historii zajętości kolejki przekracza pewną określoną wartość dla danej jednostki sprzętowej. W przypadku niniejszych badań, liczba ta zbliżona była do 2000 elementów.

Rezultaty przeprowadzonych prac badawczych potwierdziły, że wykorzystanie implementacji kontrolera niecałkowitego rzędu $PI^\alpha D^\beta$ w strukturach GPU pozwala skrócić czas odpowiedzi mechanizmu AQM. Zaprezentowane podejście pozwala uzyskać szczególną wydajność w przypadku analizy długich sekwencji historii zajętości kolejki. Jednak najistotniejszym wnioskiem jest potwierdzenie



Rysunek 2.2: Porównanie czasu odpowiedzi kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ z wykorzystaniem różnych struktur GPU, jednostki CPU oraz zmiennej liczby elementów historii zajętości kolejki.

nie możliwości zoptymalizowania czasu odpowiedzi kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ jako mechanizmu AQM, z którego wykorzystaniem wiąże się wykonywanie obliczeń o dużej złożoności. W przypadku braku stwierdzenia takiej możliwości, dalsze prace związane z próbą zastosowania kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ jako mechanizmu AQM w węzle komunikacyjnym praktycznie pozbawione zostałyby sensu. W tym przypadku ich praktyczne zastosowanie w rzeczywistej infrastrukturze sieciowej byłoby w zasadzie nieosiągalne.

Wkład autorski [60%] związany był z:

- współudziałem w wykonaniu przeglądu literatury,
- współudziałem w zaproponowaniu badań mających na celu przyspieszenie czasu obliczeń odpowiedzi kontrolera niecałkowitego rzędu $PI^\alpha D^\beta$, w oparciu o struktury GPU,
- zaimplementowaniem zaproponowanego modelu z wykorzystaniem struktur CPU oraz GPU,

- przeprowadzeniem badań eksperymentalnych,
- współdziałaniem w analizie uzyskanych wyników oraz sformułowaniem wniosków.

2.2 Publikacja 2: Combined diffusion approximation - simulation model of AQMs transient behaviour

W pracy "Combined diffusion approximation - simulation model of AQMs transient behaviour" przeprowadzono badania mające na celu wykorzystanie aproksymacji dyfuzyjnej do oceny mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką AQM (ang. Active Queue Management). Zaletą zastosowanej metody dyfuzji jest zdolność do rozważenia zarówno cech pierwszorzędnych ruchu, tj. jego intensywności, ale również zmienności wyrażonej za pomocą wariancji. Inne znane metody umożliwiające ocenę mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką, takie jak aproksymacja Fluid-Flow, umożliwiają jedynie określenie przybliżonego rozkładu średniej zajętości kolejki. Opublikowany w niniejszej pracy model łączy aproksymację dyfuzyjną z symulacją zdarzeń dyskretnych. Przewagą takiego rozwiązania jest uzyskanie opisu stanów nieustalonych dla dokładnych rozkładów czasu obsługi pakietów między kolejnymi zgłoszeniami do stanowiska, przy zastosowaniu kolejki z mechanizmem aktywnego zarządzania pakietami. Część symulacyjna modelu decyduje o stratach pakietów i modyfikuje natężenie przepływu pakietów, które wysyłane są przez nadajnik. Natomiast zastosowanie aproksymacji dyfuzyjnej pozwala na dokładne szacowanie dystrybucji pakietów.

Na podstawie tak zdefiniowanego modelu badawczego przeprowadzono ewaluację kontrolera RED oraz regulatora niecałkowitego rzędu PI^n , które zastosowane zostały jako mechanizmy aktywnego zarządzania kolejką. W fazie eksperymentalnej do oceny zaproponowanych mechanizmów brano pod uwagę takie parametry transmisji jak średnia długość kolejki oraz zmiany intensywności źródła, które wyrażono za pomocą λ .

Obliczenia dyfuzji przeprowadzono z krokiem $\Delta t = \frac{1}{\lambda}$. Na wyjściu modelu otrzymywany jest rozkład zajętości kolejki. Na tej podstawie część symulacyjna modelu decyduje o odrzuceniu, bądź też przyjęciu pakietu. Decyzja ta wpływa następnie na nową wartość intensywności źródła λ .

	K_p	K_i	η	setpoint
1	0.0001	0.0004	-1.2	10
2	0.0001	0.0004	-1.0	10
3	0.0001	0.0014	-0.8	10
4	0.0001	0.0040	-0.4	10

Tablica 2.1: Współczynniki kontrolera niecałkowitego rzędu PI^n

AQM	Diffusion	Simulation
<i>RED</i>	18.067	17.106
PI^n 1	5.100	5.251
PI^n 2	6.122	6.302
PI^n 3	7.780	7.123
PI^n 4	10.431	10.075

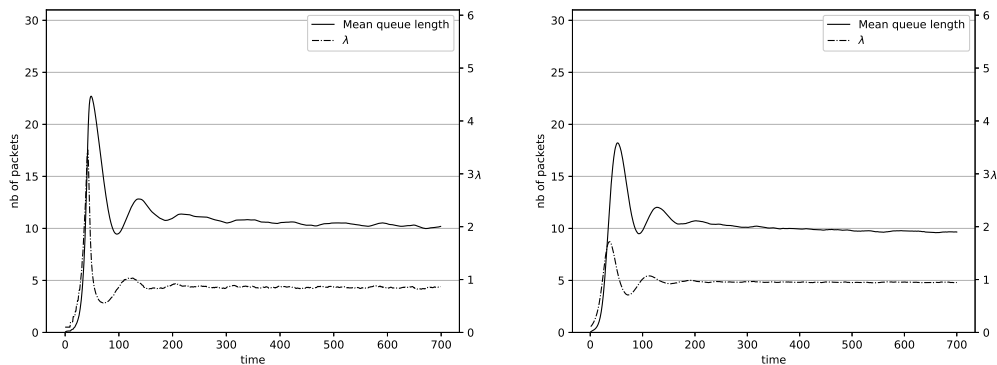
Tablica 2.2: Uzyskane średnie rezultaty zajętości kolejki dla wybranych mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką.

Parametry kontrolera niecałkowitego rzędu PI^n dobrano na podstawie rezultatów wcześniejszych prac badawczych [14, 15]. Wartości tych współczynników zestawiono w tabeli 2.1.

W przypadku gdy $\eta = -1$, wtedy oznacza to zastosowanie klasycznego kontrolera PI. Maksymalną długość kolejki w badaniach ustalono jako 30, natomiast wartość oczekiwana dla kontrolera PI^n to 10. W przypadku kontrolera RED ustalono wartość $Min_{th} = 10$ oraz $Max_{th} = 20$.

W przeprowadzonych badaniach porównano rezultaty otrzymane z wykorzystaniem zaproponowanej metody łączącej symulację z aproksymacją dyfuzyjną, w porównaniu do klasycznej metody symulacyjnej. W tabeli 2.2 zaprezentowano uzyskane średnie wartości zajętości kolejki. Natomiast szczegółowe rezultaty zajętości kolejki w stanie ustalonym dla kontrolera PI^n 4 przedstawiono na wykresie 2.3.

Uzyskane wyniki potwierdzają wpływ parametrów mechanizmu na zachowanie bufora transmisji. Średnia długość kolejki wyraźnie maleje wraz ze wzrostem parametru niecałkowitego rzędu. Z kolei zaimplementowanie modelu opartego o aproksymację dyfuzyjną sprawia, że czas wykonania pojedynczego eksperymentu ulega znacznemu wydłużeniu. Jego wykorzystanie pozwala jednak uzyskać dokładniejsze wyniki oraz szczegółowe rezultaty zajętości kolejki w stanie ustalonym.



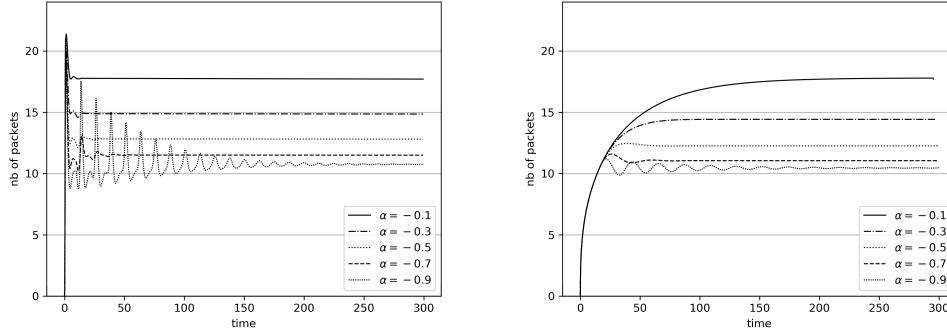
Rysunek 2.3: Średnia długość kolejki routera oraz intensywność źródła transmisji, model oparty o aproksymację dyfuzyjną (lewy wykres), klasyczną metodę symulacyjną (prawy wykres), kontroler PI^η 4.

Wkład autorski [65%] związany był z:

- współudziałem w wykonaniu przeglądu literatury,
- zaproponowaniem modelu łączącego symulację zdarzeń dyskretnych z aproksymacją dyfuzyjną, który umożliwia ocenę mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką,
- zaimplementowaniem modelu dyfuzyjnego oraz symulacyjnego,
- przeprowadzeniem badań eksperymentalnych,
- analizą uzyskanych wyników oraz zdefiniowaniem wniosków końcowych.

2.3 Publikacja 3: Diffusion approximation model of TCP NewReno congestion control mechanism

W artykule "Diffusion approximation model of TCP NewReno congestion control mechanism" zaproponowano model wykorzystujący dyfuzję aproksymacyjną do modelowania zachowania strumienia TCP. Koncepcja ta stanowi rozwinięcie badań związanych z połączeniem symulacji zdarzeń dyskretnych z aproksymacją dyfuzyjną do ewaluacji mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką.



Rysunek 2.4: Średnia zajętość kolejki, aproksymacja dyfuzyjna (lewy wykres), aproksymacja Fluid-Flow (prawy wykres), kontroler PI^α : $K_P = 0,0001$, $K_I = 0,0004$, parametr α w zakresie $[-0, 1, -0, 9]$

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania, które pozwoliły określić poprawność zaproponowanego modelu dyfuzyjnego, względem klasycznej metody analitycznej, opartej o aproksymację Fluid-Flow.

W przeprowadzonych eksperymentach numerycznych zastosowano kolejkę $G/G/1/L$, gdzie wielkość bufora to $L = 30$.

Zastosowanie zaproponowanego modelu dyfuzyjnego pozwoliło na uzyskanie pełnego rozkładu kolejki, a nie tylko wartości średnich. Rozkład kolejki $f(n, t, n_0)$ pozwala natomiast obliczyć funkcję gęstości $r(t, x)$ opóźnień występujących w transmisji:

$$r(t, x) = \sum_{n=0}^L f(n, r; n_0) b(x)^{(n+1)*} \quad (2.1)$$

gdzie $b(x)$ jest funkcją gęstości prawdopodobieństwa czasu obsługi pakietu, co z kolei pozwala wyznaczyć maksymalne różnice opóźnień między pakietami w łańcuchu transmisyjnym, a więc wariancję ruchu (ang. jitter).

Na wykresie 2.4 przedstawiono uzyskane rezultaty zajętości kolejki w przypadku zastosowania kontrolera niecałkowitego rzędu PI^α z wykorzystaniem zaproponowanego modelu opartego o aproksymację dyfuzyjną (lewy wykres 2.4) oraz aproksymację Fluid-Flow (prawy wykres 2.4).

Uzyskane rezultaty potwierdziły poprawność zaproponowanego modelu. Otrzymane średnie wartości zajętości kolejki były bardzo zbliżone do rezultatów przy wykorzystaniu klasycznej metody opartej o aproksymację Fluid-Flow. Wy-

niki te wykazują silny wpływ parametru α kontrolera niecałkowitego rzędu PI, na poziom zajętości kolejki. Wraz z jego spadkiem, średnie odnotowane wartości zajętości bufora maleją od 17.764 (gdy $\alpha = -0.1$) do 10.448 (dla $\alpha = -0.9$).

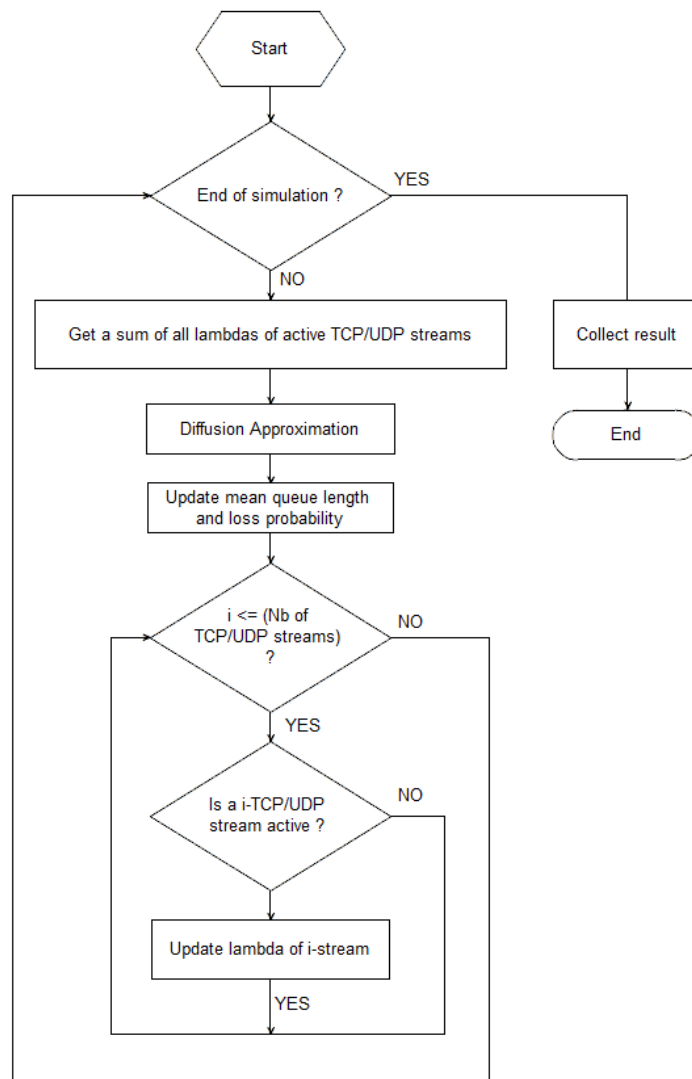
Wkład autorski [60%] związany był z:

- współudziałem w wykonaniu przeglądu literatury,
- zaproponowaniem modelu łączącego symulację zdarzeń dyskretnych z aproksymacją dyfuzyjną, który umożliwia ocenę mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką,
- zaimplementowaniem modelu dyfuzyjnego oraz modelu opartego o analityczną metodę Fluid-Flow,
- przeprowadzeniem badań eksperymentalnych,
- analizą uzyskanych wyników oraz współudziałem w sformułowaniu wniosków.

2.4 Publikacja 4: Diffusion Model of a Non-Integer Order PI^γ Controller with TCP/UDP Streams

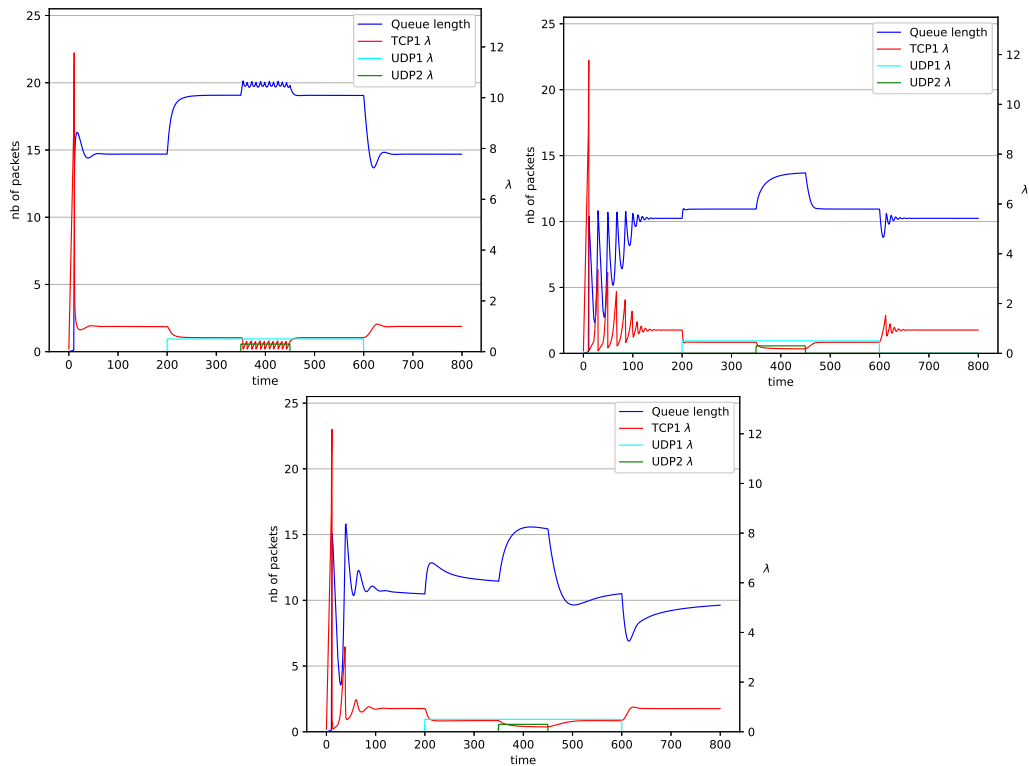
Publikacja "Diffusion Model of a Non-Integer Order PI^γ Controller with TCP/UDP Streams" stanowi kontynuację wcześniejszych prac związanych z zaproponowaniem modelu łączącego symulację zdarzeń dyskretnych z aproksymacją dyfuzyjną, który służy do oceny mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką, w tym kontrolera PI^γ niecałkowitego rzędu. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania mające na celu ocenę wydajności transmisji przy zastosowaniu większej liczby strumieni TCP/UDP. Uzyskane rezultaty pozwoliły ocenić dynamikę transmisji, kiedy różne źródła TCP/UDP rozpoczynają lub kończą transmisję. Wykazały także zalety wynikające z zastosowania kontrolera PI niecałkowitego rzędu, względem tradycyjnego mechanizmu AQM, w tym zmniejszenia fluktuacji rozkładu zajętości kolejki. W tym artykule rozszerzona została funkcjonalność mechanizmu wykorzystującego aproksymację dyfuzyjną do modelowania zachowania strumienia TCP, o możliwość przeanalizowania większej ilości strumieni TCP/UDP. Z drugiej strony zaproponowane podejście umożliwia zupełnie nowe spojrzenie na współpracę protokołu TCP/UDP z mechanizmami AQM. Model ten pozwala na rozpoczęcie i zakończenie transmisji TCP/UDP

w dowolnym momencie. Umożliwia to obserwację parametrów transmisji oraz ich wpływu na ewolucję okna przeciążenia TCP, podczas gdy różne źródła rozpoczynają lub kończą przesył danych. Schemat blokowy algorytmu wykorzystywanego w niniejszej pracy przedstawiono na rysunku 2.5.



Rysunek 2.5: Schemat blokowy algorytmu w zaproponowanym modelu.

Na wykresie 2.6 przedstawiono transmisję z jednym aktywnym strumieniem



Rysunek 2.6: Transmisja dla jednego strumienia TCP oraz dwóch strumieni UDP, kontroler RED (lewy wykres), kontroler NLRED (prawy wykres), kontroler PI^γ niecałkowitego rzędu (środkowy wykres).

TCP oraz dwoma zmiennymi strumieniami UDP, w przypadku zastosowania kontrolera RED oraz PI^γ niecałkowitego rzędu. Pierwszy strumień UDP rozpoczyna transmisję w czasie $t = 200$ i kończy w $t = 600$. Drugi strumień UDP jest aktywny między $t = 350$ a $t = 450$ i powoduje przeciążenie kolejki. W obu przypadkach, zarówno w przypadku mechanizmu RED, jak też dla kontrolera PI^γ , poziom zajętości kolejki dynamicznie wzrasta. Jednak w przypadku wykorzystania mechanizmu PI^γ zajętość kolejki powoli zaczyna się stabilizować, a następnie zmniejszać (środkowy wykres 2.6). Obserwacja taka nie zachodzi w przypadku mechanizmu RED oraz NLRED (lewy oraz prawy wykres 2.6), ponieważ nie są one w stanie efektywnie obsłużyć takiej ilości danych wejściowych. Ponadto w przypadku algorytmu RED wielkość kolejki oscyluje wokół punktu Max_{th} .

Przeprowadzone eksperymenty badawcze wykazały różnice w uzyskanych pa-

rametrach transmisji oraz poziomie zajętości bufora, w przypadku zastosowania różnych mechanizmów AQM. Uwidocznily również zalety wykorzystania kontrolera niecałkowitego rzędu PI^γ jako mechanizmu aktywnego zarządzania kolejką. Ponadto dodatkowym wnioskiem z fazy eksperymentalnej jest obserwacja potwierdzająca, że zmniejszenie wartości rzędu całkowania kontrolera PI^γ skutkuje zmniejszeniem fluktuacji długości kolejki, a przez to pośrednio wpływa na zmniejszenie zmienności natężenia ruchu sieciowego.

Wkład autorski [65%] związany był z:

- współudziałem w wykonaniu przeglądu literatury,
- zaproponowaniem modelu opartego o aproksymację dyfuzyjną, który pozwala ocenić wpływ zastosowania kontrolera PI^γ niecałkowitego rzędu, przy zastosowaniu większej liczby strumieni TCP/UDP,
- zaimplementowaniem modelu dyfuzyjnego oraz symulacyjnego,
- przeprowadzeniem badań eksperymentalnych,
- analizą uzyskanych wyników oraz zdefiniowaniem wniosków końcowych.

2.5 Publikacja 5: Approximation Models for the Evaluation of TCP/AQM Networks

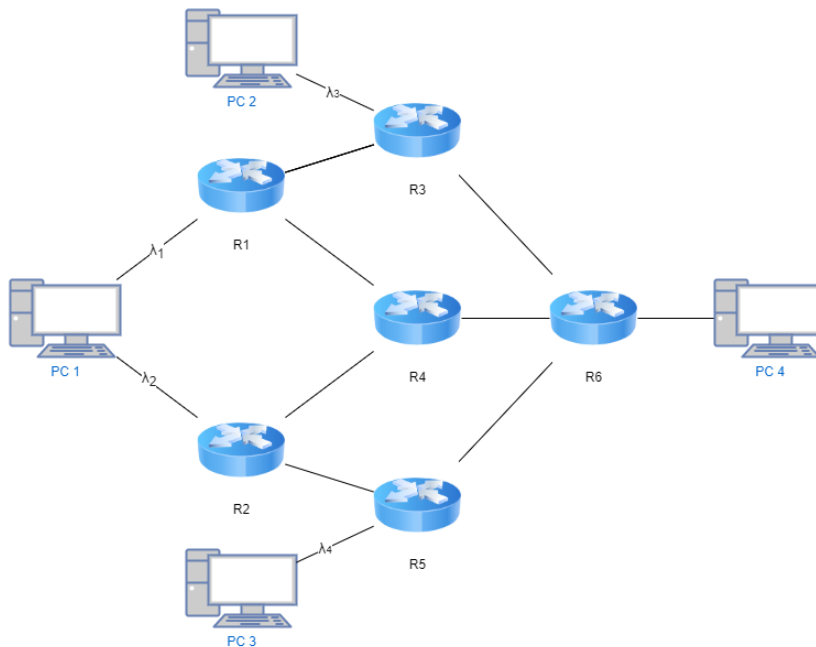
Artykuł "Approximation Models for the Evaluation of TCP/AQM Networks" przedstawia sieciowy model wykorzystujący aproksymację dyfuzyjną do oceny współpracy mechanizmu okna przeciążenia TCP i jego kooperacji z mechanizmami aktywnego zarządzania kolejką. Model rozpatruje możliwość istnienia jednocześnie wielu strumieni TCP oraz UDP, a także stanowi wielowęzłowe rozszerzenie koncepcji przyjętej we wcześniejszej pracy "Diffusion Model of a Non-Integer Order PI^γ Controller with TCP/UDP Streams", przedstawionej w niniejszej rozprawie.

W fazie eksperymentalnej, oprócz kontrolera niecałkowitego rzędu PI^γ , wykorzystano również mechanizm RED oraz NLRED, stanowiące klasyczne rozwiązania z zakresu algorytmów aktywnego zarządzania kolejką.

Zaproponowany model zweryfikowano z wykorzystaniem aproksymacji Fluid-Flow. Model ten stworzony został w celu ewaluacji współpracy mechanizmu AQM z protokołem TCP. Zgodnie z wnioskami z prac wcześniejszych, za-

stosowanie modelu dyfuzyjnego pozwala oprócz intensywności źródła uwzględnić również jego zmienność, czyli wariancję. Jego zaimplementowanie umożliwia także rozpatrywanie bardziej złożonych modeli sieciowych.

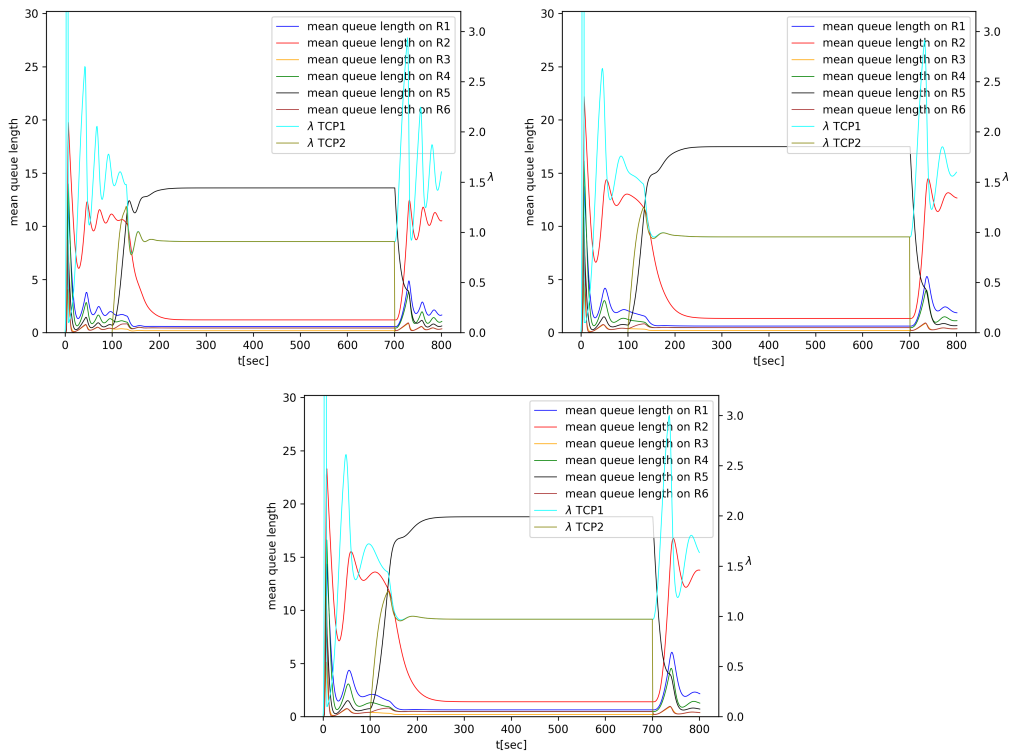
Topologia sieci, którą zaimplementowano do zaplanowanych badań, przedstawiona została na rysunku 2.7. Rozważany system składał się więc z sześciu routerów, trzech stacji nadawczych oraz jednej stacji odbiorczej. Aby zweryfikować poprawność otrzymanych wyników, wykonano 100 tysięcy symulacji sieciowych, mających na celu uśrednienie otrzymanych wyników dla pojedynczego eksperymentu.



Rysunek 2.7: Schemat przyjętego modelu sieci składającej się z sześciu routerów, trzech stacji nadawczych oraz jednej stacji odbiorczej.

Wykresy przedstawione na rysunku 2.8 prezentują wyniki uzyskane w przypadku aktywnej transmisji z dwoma strumieniami TCP.

Strumień TCP2 rozpoczyna się w czasie $t = 100$, kończy w $t = 700$ i transmitowany jest z wykorzystaniem routera R5 (λ_4). Strumień TCP1 rozchodzi się natomiast na routerach R1 (λ_1) oraz R2 (λ_2). Analiza otrzymanych rezultatów wskazuje, że oba strumienie dążą do maksymalnego wykorzystania łącza. Jednakże największy wpływ zauważalny jest na węzłach bezpośrednio podłączonych



Rysunek 2.8: Średnia zajętość kolejki dla transmisji z dwóch strumieniami TCP, kontroler NLRED (lewy wykres), kontroler RED (prawy wykres), kontroler PI^γ (środkowy wykres).

do stacji nadawczych. Zajętość węzłów bardziej oddalonych od źródła ruchu jest w tym przypadku niewielka.

W ramach zaplanowanych prac zrealizowano również szczegółowe badania związane z analizą wydajności dla kontrolera PI^γ niecałkowitego rzędu, względem tradycyjnych mechanizmów RED oraz NLRED. Rozważano scenariusze dla jednego strumienia TCP, w których pomiędzy nadajnikiem, a odbiornikiem ustanowiono jeden, a następnie trzy routery pośredniczące. Kolejne fazy eksperymentów przeprowadzono z dodatkowymi strumieniami UDP. Jednak wszystkie uzyskane rezultaty wskazały, że w przypadku zastosowania kontrolera PI^γ niecałkowitego rzędu jako mechanizmu AQM, zaobserwowano większe średnie zajętości kolejki oraz optymalne wykorzystanie łącza transmisyjnego. Rezultaty otrzymane z wykorzystaniem aproksymacji Fluid-Flow potwierdziły poprawność zapropono-

wanego modelu. Metoda ta jest tradycyjnym rozwiązaniem stosowanym do oceny współpracy mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką z protokołem TCP.

Dzięki zastosowaniu modelu dyfuzyjnego możliwe było rozpatrywanie ruchu, który nie rozkłada się w sposób równomierny na wszystkich dostępnych węzłach w sieci. Pozwala to na rozpatrywanie bardziej złożonych modeli i topologii. Ponadto model dyfuzyjny dostarcza informacje o rozkładzie kolejek oraz o wariancji ruchu sieciowego, co z kolei pozwala na lepszą obserwację stanów przejściowych oraz dynamiki transmisji.

Wkład autorski [60%] związany był z:

- współudziałem w wykonaniu przeglądu literatury,
- zaproponowaniem modelu opartego o aproksymację dyfuzyjną, który pozwala ocenić mechanizmy aktywnego zarządzania kolejką,
- zaimplementowaniem wielowęzłowej implementacji modelu dyfuzyjnego,
- zaimplementowaniem metody aproksymacji Fluid-Flow, która umożliwiła zweryfikowanie zaproponowanego modelu,
- przeprowadzeniem eksperymentów badawczych,
- analizą uzyskanych wyników oraz sformułowaniem wniosków końcowych.

Rozdział 3

Podsumowanie

Głównym celem pracy była ocena wykorzystania koncepcji mechanizmu aktywnego zarządzania pakietami (AQM) w oparciu o kontroler $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitych rzędów. Rezultaty eksperymentów badawczych zawartych w niniejszej rozprawie dowodzą postawionej w tej pracy tezie i pozwalają wysnuć następujące wnioski:

Wniosek 1. *Oparcie mechanizmu aktywnego zarządzania kolejką (AQM) o kontroler $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitych rzędów pozwala na zmniejszenie średniej zajętości kolejki, a przez to na zwiększenie przepustowości transmisji danych w sieci Internet.*

Wniosek 2. *Modele aproksymacji dyfuzyjnej umożliwiają ocenę kooperacji strumieni TCP i UDP z mechanizmami aktywnego zarządzania kolejką (AQM). W porównaniu do najczęściej stosowanej metody aproksymacji Fluid-Flow, aproksymacja dyfuzyjna umożliwia pozyskanie bardziej szczegółowych wyników związanych z zachowaniem kolejki oraz pozwala na modelowanie bardziej złożonych struktur sieci rozległej.*

W niniejszej rozprawie wykorzystano symulator zdarzeń dyskretnych SimPy opracowany w języku Python oraz dwa modele analityczne - aproksymację Fluid-Flow oraz aproksymację dyfuzyjną. Modele analityczne zostały zaimplementowane w językach Python oraz C.

Uzyskane w ramach tej pracy wyniki służą ocenie zaproponowanych mechanizmów w porównaniu do już istniejących oraz powszechnie wykorzystywanych mechanizmów aktywnego zarządzania kolejką. Uzyskane wyniki wykazały, że zaproponowany w pracy mechanizm AQM bardzo dobrze nadaje się do regulowania

długości kolejki. W zależności od doboru parametrów kontrolera można uzyskać mechanizm AQM o różnych właściwościach. Regulując współczynniki elementu całkującego i proporcjonalnego kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ można zwiększać lub zmniejszać jego "moc". Kontroler "silniejszy" lepiej utrzymuje długość kolejki na poziomie oczekiwanym. Odbywa się to kosztem wzrostu liczby odrzuconych pakietów. Zmniejszając jego moc, zmniejszamy straty, kosztem wzrostu średniej długości kolejki. Badania wykazały również istotność rzędów całkowania. Na przykład zmniejszając jego wartość, zmniejszamy fluktuacje długości kolejki i pośrednio zmniejszamy zmienność natężenia ruchu sieciowego.

We wstępie pracy zaznaczono, że implementacja kontrolera niecałkowitych rzędów jest złożona obliczeniowo. Implementacje wykonane w strukturach GPU wykazały, że czas obliczeń odpowiedzi kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ nie będzie krytyczny, a przez to nie będzie powodował zmniejszenia prędkości transmisji.

Kierunek dalszych prac badawczych związany będzie ze stworzeniem dedykowanego oprogramowania umożliwiającego przeprowadzanie badań mechanizmu aktywnego zarządzania kolejką opartego o kontroler $PI^\alpha D^\beta$ niecałkowitego rzędu w przełącznikach sieciowych. Celem tych prac będzie przeprowadzenie pełnych badań z wykorzystaniem rzeczywistej infrastruktury sieciowej. Rozwiązanie to oparte będzie o routery z systemem OpenWRT. W celu przyspieszenia czasu obliczeń kontrolera $PI^\alpha D^\beta$ ponownie wykorzystane zostaną zweryfikowane już struktury GPU. Do jednej ze ścieżek związanej z tymi pracami należeć będzie również zaimplementowanie zaproponowanego modelu w macierzach programowalnych FPGA.

W ramach przyszłych prac rozwijany będzie również model aproksymacji dyfuzyjnej, który może być wykorzystany do analizy wydajności sieci definiowanej programowo SDN (ang. Software Defined Network). Pierwsze uzyskane wyniki zostały już przedstawione w artykule "Time-Dependent Performance of a Multi-Hop Software Defined Network" [16], którego jednak nie dołączono do listy publikacji zawartych w ramach niniejszej rozprawy.

Bibliografia

- [1] Domański, A.: Wpływ mechanizmów protokołu TCP oraz algorytmów kolejowania na transmisję danych w sieci Internet. *Studia Informatica*, Vol. 38(1A), s. 3-245, 2017.
- [2] Floyd, S., Jacobson, V.: Random Early Detection gateways for congestion avoidance. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 1(4), 1993.
- [3] May, M., Diot, C., Lyles, B. and Bolot, J.: Influence of Active Queue Management parameters on aggregate traffic performance. Technical report, Institut de Recherche en Informatique et en Automatique, Rocquencourt, Le Chesnay, 2000.
- [4] Tan, L., Zhang, W., Peng, G. and Chen, G.: Stability of TCP/RED systems in AQM routers. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 51(8), s. 1393 – 1398, 2006.
- [5] Floyd, S., Gummadi, R., Shenker, S.: Adaptive RED: An Algorithm for Increasing the Robustness of RED's Active Queue Management. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011.
- [6] Zheng, B., Atiquzzaman, M.: DSRED: An Active Queue Management Scheme for New Generation Network, *Local Computer Networks*, 2000.
- [7] Zhou K., Yeung K. L., Li V.: Nonlinear RED: A simple yet efficient Active Queue Management scheme. *Elsevier Computer Networks*, Vol. 50, s. 3784 - 3794, 2006.
- [8] Domańska, J., Augustyn, D.R., Domański, A.: The choice of optimal 3-rd order polynomial packet dropping function for NLRED in the presence of self-similar traffic. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, Vol. 60, 2012.

- [9] Floyd, S., Kohler, E.: Internet Research Needs Better Models. *Computer Communication Review*, Vol. 33(1), s. 29 - 34, 2003. doi:10.1145/774763.774767.
- [10] Domańska, J.: Markowowskie modele natężenia przesyłów internetowych. Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk, 2014.
- [11] Misra, V.; Gong, W.-B.; Towsley, D.: Fluid-based Analysis of a Network of AQM Routers Supporting TCP Flows with an Application to RED. *ACM SIGCOMM*, 2000. doi:10.1145/347059.347421.
- [12] Czachórski, T., Pekergin, F.: Diffusion Approximation as a Modelling Tool. *Network Performance Engineering. A Handbook on Convergent Multi-Service Networks and Next Generation Internet*. Springer Berlin Heidelberg, s. 447 - 476, 2011. doi:10.1007/978-3-642-02742-0_20.
- [13] Domański, A., Domańska, J., Czachórski, T.: The Drop-From-Front Strategy in AQM. *Next Generation Teletraffic and Wired/Wireless Advanced Networking*, Springer Berlin Heidelberg, s. 61 - 72, 2007. doi:10.1007/978-3-540-74833-5_6.
- [14] Domański, A., Domańska, J., Czachórski, T., Klamka, J., Marek, D., Szyguła, J.: The Influence of the Traffic Self-similarity on the Choice of the Non-integer Order PI^α Controller Parameters. *Communications in Computer and Information Science*. Springer International Publishing, Vol. 935, s. 76-83, 2018. doi:10.1007/978-3-030-00840-6_9.
- [15] Domański, A., Domańska, J., Czachórski, T., Klamka, J., Szyguła, J., Marek, D.: AQM mechanism with the dropping packet function based on the answer of several PI^α controllers. *Communications in Computer and Information Science*, Springer International Publishing, Vol. 1039, s. 400-412, 2019. doi:10.1007/978-3-030-21952-9_29.
- [16] Czachórski, T.; Gelenbe, E.; Kuaban, G.S.; Marek, D: Time-Dependent Performance of a Multi-Hop Software Defined Network. *Appl. Sci.* 2021, vol. 11, 2469. doi:10.3390/app11062469.