

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Tomasza Piotra Osińskiego

która odbędzie się w dniu **16.06.2023 roku**, o godzinie **13:00** w trybie łączonym (stacjonarnie równoległe ze zdalnie)

Temat rozprawy:

„Data plane programmability for software datapaths in a virtualized network infrastructure”

Promotor: dr hab. inż. Halina Tarasiuk – Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Piotr Chołda, prof. Uczelni – Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

prof. Christian Esteve Rothenberg, PhD – Universidade Estadual De Campins (Brazylia)

prof. Giacomo Verticale, PhD – Politecnico di Milano (Włochy)

Obrona odbędzie się w Sali nr 116 oraz jednocześnie zdalnie na platformie MS Teams. Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie w formie zdalnej proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: dr hab. inż. Marcin Kowalczyk, email: Marcin.Kowalczyk@pw.edu.pl, do dnia 14.06 godz. 16:00.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Rada-Naukowa-Dyscypliny-Informatyka-Techiczna-i-Telekomunikacja/mgr-inz.-Tomasz-Piotr-Osinski/Rozprawa-doktorska>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja

Politechniki Warszawskiej

dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni

Programowalna warstwa przekazu danych dla funkcji sieciowych w środowisku zwirtualizowanej infrastruktury telekomunikacyjnej

STRESZCZENIE

Technika sieci programowalnych (ang. Software-Defined Networking - SDN) radykalnie zmieniła podejście do budowania nowoczesnych systemów telekomunikacyjnych takich jak sieci 5G i 6G. Jednocześnie ostatnie innowacje w obszarze programowalnej warstwy przekazu danych dla sieci SDN pozwalają na implementację algorytmów przetwarzania pakietów w urządzeniach sieciowych wykorzystując wysokopoziomowe abstrakcje programistyczne takie jak język P4. Jednakże techniki programowalnej warstwy przekazu danych są obecnie wykorzystywane głównie dla sprzętowych urządzeń sieciowych takich jak programowalne switche czy karty sieciowe, natomiast zastosowania dla funkcji sieciowych w środowisku zwirtualizowanej infrastruktury sieciowej są ograniczone. Jednocześnie switche programowe zrealizowane jako moduły oprogramowania (ang. software switches) stały się niezbędnym komponentem nowoczesnym systemów wirtualizacji funkcji sieciowych NFV (ang. Network Function Virtualization) umożliwiając komunikację siecią oraz implementację zaawansowanych usług sieciowych w centrach danych. Mimo to, nowe rozwiązania takie jak sieci 5G narzucają nowe wymagania (np. nowe protokoły sieciowe) na funkcje sieciowe w środowisku zwirtualizowanej infrastruktury sieciowej, a operatorzy sieci chcą mieć możliwość wdrażania nowych technik (m.in. obsługi protokołów sieciowych) w warstwie przekazu danych w krótkim czasie.

Celem niniejszej rozprawy jest zastosowanie techniki programowalnej warstwy przekazu danych do switczy programowych, tak aby ułatwić implementację oraz skrócić czas wdrażania nowych technik sieciowych w środowisku zwirtualizowanej infrastruktury telekomunikacyjnej. W niniejszej rozprawie zaprezentowane zostały dwa oryginalne rozwiązania: P4rt-OVS oraz NIKSS. Oba rozwiązania pozwalają definiować sposób przetwarzania pakietów w sieci wykorzystując technikę P4, wysokopoziomowy język programowania dla warstwy przekazu danych. Dlatego też systemy P4rt-OVS oraz NIKSS pozwalają w krótkim czasie i bez specjalistycznej wiedzy o mechanizmach przetwarzania pakietów tworzyć prototypy protokołów sieciowych, wdrażać nowatorskie algorytmy przetwarzania pakietów, czy też dostosowywać

obecnie działające mechanizmy przetwarzania pakietów. Ponadto, rozwiązania P4rt-OVS oraz NIKSS zintegrowane z siecią programowalną umożliwiają implementację nowatorskich usług sieciowych, które nie byłyby inaczej możliwe do zaimplementowania lub wymagałyby znaczących nakładów. W niniejszej rozprawie zaprezentowano również oryginalne zastosowania wykorzystujące systemy P4rt-OVS oraz NIKSS w kontekście sieci programowalnych od końca do końca.

Rozwiązanie P4rt-OVS jest oryginalnym rozszerzeniem systemu Open vSwitch, który jest wykorzystywany w nowoczesnych systemach wirtualizacji sieci. Architektura P4rt-OVS pozwala wykorzystywać dotychczasowe możliwości platformy Open vSwitch, a jednocześnie rozszerza ją o programowalną warstwę przekazu danych. Badania wydajnościowe pokazały, że P4rt-OVS nie wprowadza znaczących narzutów wydajnościowych w porównaniu do obecnego modelu przetwarzania pakietów na platformie Open vSwitch, a jednocześnie dostarcza możliwość rozszerzania tej platformy w czasie działania o dowolne protokoły sieciowe, czy też stanowe algorytmy przetwarzania pakietów.

Rozwiązanie NIKSS jest oryginalnym switchem zrealizowanym jako moduł oprogramowania dla sieci SDN. NIKSS cechuje się wysokopoziomowym i w pełni funkcjonalnym językiem programowania, wysoką wydajnością, możliwością programowania w czasie działania oraz łatwością w zarządzaniu. Rozwiązanie NIKSS wykorzystuje architekturę PSA (ang. Portable Switch Architecture) jako abstrakcyjny model przetwarzania pakietów oraz technikę eBPF jako platformę przetwarzania pakietów zapewniającą programowalność w czasie działania oraz łatwość w zarządzaniu. Wysoka wydajność przetwarzania pakietów na sekundę została osiągnięta poprzez połączenie możliwości techniki eBPF oraz kompilatora PSA-eBPF, autorskiego rozszerzenia do kompilatora języka P4. Jednym z osiągnięć w ramach pracy nad rozwiązaniem NIKSS jest realizacja algorytmu klasyfikacji pakietów typu "ternary" dla platformy eBPF oraz optymalizacje wydajnościowe. W niniejszej rozprawie udowodniono, że rozwiązanie NIKSS może być z powodzeniem używane w nowoczesnych systemach NFV. Ponadto, badania wydajnościowe pokazały, że NIKSS jest realną alternatywą dla obecnie istniejących rozwiązań.

Rozwiązania P4rt-OVS oraz NIKSS zostały udostępnione publicznie jako otwarte oprogramowanie i mogą być wykorzystywane do prowadzenia badań lub tworzenia systemów telekomunikacyjnych.

Słowa kluczowe: sieci programowalne, programowalna warstwa przekazu danych, P4, eBPF



Campinas, May-15, 2023

Faculty of Electronics and Information Technology
Nowowiejska 15/19
00-665 Warszawa
POLAND

Subject: Evaluation report of the Doctoral thesis by Tomasz Piotr Osiński

Being appointed as an external reviewer, this document serves as my assessment of the Ph.D. Thesis by Tomasz Piotr Osiński. The title of the thesis is “Data plane programmability for software datapaths in a virtualized network infrastructure”, which is an accurate statement for the main topic and contributions of the thesis. In the following, the evaluation report covers the requested aspects.

Layout:

The thesis follows a well-defined structure that consists of six chapters. After the introduction Chapter 1 that provides an overview and setting the context for the research conducted, Chapter 2 that delves into the foundational knowledge required to understand the research, Chapter 3 examines the motivations and requirements behind the development of adequate programmable software switches for Software-Defined Networking (SDN). Various use cases are discussed and the necessary requirements for such SDN software switches are outlined along with a discussion on the limitations of existing solutions. In Chapters 4 and 5, the thesis presents the primary contributions, encompassing the design, implementation, and experimental evaluation of P4rt-OVS and NIKSS. Chapter 6, the final chapter, provides a summary of the entire thesis. It outlines the research outcomes achieved through the two proposed SDN software switches P4rt-OVS and NIKSS, highlighting their contributions to the field of programmable network data planes.

Overall, the thesis is structured in a logical and sequential manner, allowing readers to follow the progression of the research, from introductory concepts to detailed designs and evaluations, evolving from the initial contributions of P4rt-OVS to the improved design aspects brought by NIKSS, ultimately culminating in a comprehensive summary and future research prospects.

Literature:

The literature review is adequately covered in Chapter 3 and the position of the thesis contributions embodied in P4rt-OVS and NIKSS can be evidenced in Table 3.1 that provides a clear comparison of the most relevant state-of-the-art programmable software switches. The contributions of P4rt-OVS and NIKSS to advances in the state of the art are comprehensive and notable. In the initial part of Chapters 4 and 5 the literature and limitations of existing solutions are revisited.

Purpose:

The goal of this PhD dissertation is to explore the benefits of data plane programmability for software switches in virtualized networks. The purpose of the PhD is presented through the objectives to provide

answers to three relevant research questions around the design and implementation of SDN software switches.

The main objectives of the PhD can be synthesized around the following tasks regarding the two main software switches proposed (P4rt-OVS and NIKSS):

- To design and implement two systems that enable data plane programmability for software switches using P4 language: P4rt-OVS and NIKSS.
- To evaluate the performance, flexibility and operability of P4rt-OVS and NIKSS in different scenarios and compare them with existing software switches.
- To demonstrate the potential of P4rt-OVS and NIKSS for enabling novel network protocols and applications in end-to-end programmable networks.

P4rt-OVS extends Open vSwitch, the most popular SDN software switch, with protocol-independent and stateful packet processing capabilities of P4. NIKSS creates a new P4-programmable software datapath that leverages eBPF as a packet processing engine and P4 Portable Switch Architecture as a programming abstraction. Both systems enable novel network protocols and applications that can be easily prototyped and deployed in end-to-end programmable networks. The systems also achieve high performance and operability.

Methodology:

The proposed methodology is sensible and follows good practices of software engineering and networked systems. The thesis starts by identifying a set of requirements for a programmable SDN software switch that unfold into a set of objectives targeting gaps in state-of-the-art software datapaths. An initial approach is carried out through the design, implementation, and experimental evaluation of P4rt-OVS. Leveraging the experience and the identified limitations of P4rt-OVS, a second iteration to the main objectives of novel programmable SDN software switches is conducted through the design, implementation, and experimental evaluation of NIKSS. The validation of the proposed software switches is ratified through extensive functional and performance evaluation in relevant use cases and proper experiments, including microbenchmarks and in-depth performance analysis of test programs. In all of the chapters, the final conclusions section distills the relevant outcomes which contributes to an adequate line of thought. The concluding chapter provides convincing answers to the core research questions addressed by the PhD thesis.

Research Results:

As already stated, the main research results are the two software switch systems, P4rt-OVS and NIKSS, that enable advanced data plane programmability for software switches in virtualized networks using P4 language. P4rt-OVS is an extension of Open vSwitch that supports protocol-independent and stateful packet processing through the incorporation of a P4 pipeline. The NIKSS software datapath uses eBPF as a packet processing engine and P4 Portable Switch Architecture as the programming abstraction. Both systems allow the implementation of novel network protocols and applications with high performance and flexibility. The systems are open-source and can be used for research and development.

As eloquently elaborated in the concluding Section 6, the research results of the PhD thesis can be understood through the answers provided to three research questions: (1) Can programmable data plane and P4 be successfully used for software datapaths without sacrificing performance? Yes; (2) Given the hardware

focus, is P4 flexible enough to express all software capabilities needed to implement most common features of a hypervisor switch or Virtual Network Function? Generally yes, but there are limitations; (3) Is the P4 Portable Switch Architecture (PSA) the right architecture for software datapaths? Partially.

Although not explicitly presented as result contributions, the author has contributed to seven publications (references [127] to [133]), all of them regarded as high quality venues in the networking community. P4rt-OVS [132] was published in IFI 2020 and NIKSS [130] in ACM CoNEXT 2022, a tier 1 conference in the field of networking and distributed systems.

Noteworthy are the reproducibility results of NIKSS [130] that we recognized through the award of three ACM reproducibility badges, namely Artifacts Evaluated – Functional v1.1, Artifacts Available v1.1, and Results Reproduced v1.1

Applicability:

Beyond the common scientific applicability of the research publications resulting from the PhD, highly remarkable is the open-source nature of both P4rt-OVS (<https://github.com/Orange-OpenSource/p4rt-ovs>) and NIKSS (<https://github.com/NIKSSvSwitch/nikss>). As already highlighted, the main publication outcome (CoNEXT [130]) received a valuable recognition regarding the applicability of the results through three ACM artifact review and badging distinctions: Artifacts Evaluated – Functional, Artifacts Available, and Results Reproduced.

Correctness:

No flaws have been identified and overall the language used is correct regarding English grammar and adequate use of technical terms as expected in a scientific production. There are only few minor improvements that could be done, for instance a very large single paragraph on page 68 (Section 3.3) when discussing existing solutions in the state of the art.

Originality:

The thesis features novel contributions to the field of SDN software switches as noted in the state-of-the-art comparison in Table 3.1. The originality of the PhD can be also evidenced through the high-quality publication achievements.

In essence, P4rt-OVS enables runtime data plane programmability for OVS using P4 and leverages userspace BPF for extensibility while maintaining performance. NIKSS's P4-programmable packet processing model has two designs: a general-purpose design and a specialized design for better performance. A ternary packet classification algorithm for eBPF was designed and implemented. The PSA to eBPF compiler is an extension to the P4 compiler that implements the PSA model for NIKSS, with compiler optimizations for eBPF code performance. All of them have been contributed as open-source.

Knowledge & Independence:

There is sufficient evidence to assess that the PhD thesis demonstrates the candidate's overall theoretical and practical knowledge to carry out impact and quality research work in the field of networking, more

specifically in the subfield of programmable software switches. There are also convincing signs (e.g. first author role of the candidate in multiple scientific publications) of independence in the scientific work, a feature of the candidate that can be also recognized through the logical organization of the PhD manuscript.

Conclusions:

The conclusion of this review report is very positive, as argued throughout the key aspects assessed so far. As per the concluding remarks in the PhD manuscript itself, Section 6.1 provides a convincing wrap up discussion on the research outcomes of the PhD work. Furthermore, each Chapter includes a conclusions section that contributes to a comprehensive analysis of the work in scope obtained.

After taking into consideration all the evaluated elements, my judgment is that the thesis features the expected quality and contributions of a PhD degree, and, therefore, the candidate is ready for defense.

Despite all the positive highlights regarding the quality of the PhD pointed out by this reviewer, due to lack of familiarity with the common institutional practices to indicate a distinguishment, this reviewer does not oppose to such a justification but prefers not to individually pursue this aspect of the PhD work.



Prof. Christian R. E. Rothenberg
DCA-FEEC-UNICAMP
Matricula 30451-3

PROF. DR. CHRISTIAN ESTEVE ROTHENBERG
UNICAMP/FEEC/DCA
Matr. 304513

Prof. Giacomo Verticale, PhD
Dipartimento di Elettronica Informazione e Bioingegneria
Politecnico di Milano
piazza Leonardo da Vinci 32
Milano (MI)
ITALY

DOCTORAL DISSERTATION REVIEW

Title of the PhD dissertation on which the candidate is applying in the current procedure for the award of PhD degree

Review of the PhD dissertation “Data plane programmability for software datapaths in a virtualized network infrastructure” written by the candidate Tomasz Piotr Osinski.

Assessment of the layout of the dissertation, including information on its various components

The dissertation is well written and well structured. Chapter 2 discusses the state of the art, Chapter 3 discusses a number of relevant use cases and the related work. Chapter 4 describes and evaluates the first original proposal of the dissertation, i.e. the P4rt-OVS software switch. Chapter 5 describes and evaluates the second original proposal of the dissertation, i.e. the NIKSS software switch. Chapter 6 reviews the contribution of the work. Finally, two appendices review more in detail the methodology to measure CPU cycles in NIKSS and how to perform DDOS mitigation with P4rt-OVS.


Chapters 2 and 3 comprise an extensive review of the relevant literature. The dissertation covers literature from the most important scientific venues on the topic of network programmability and also covers recent open-source projects. Chapters 4 and 5 are well balanced, covering the motivation, the design choices and the evaluation of the performance of the prototype. The results show that the proposed solution can achieve high data rates.

Evaluation of the literature used within the dissertation

The literature is extensive and up to date. About two thirds of the references are recent papers from the most significant venues in the fields of network programmability and of system design. The other references comprise open-source project repositories and technical documents from open-source projects.

Indication and assessment of the purpose of the candidate's work

The motivation of the work is mostly discussed in Chapter 3 and consists in proving that it is feasible to apply data plane programmability concepts to software switches. In particular, the candidate wants



to provide evidence that the P4 abstraction for data-plane programmability, which was developed for hardware switches, can be successfully used also for software switches with good performance.

The motivation of the work is valid. While programmable software switches are not novel, no uniform abstraction layer has been successfully deployed so far. The P4 layer has gained significant traction in recent years also in the context of software switches and the candidate's work was a precursor to other, more recent, industry-supported project leveraging the same ideas.

Indication and evaluation of the testing methods used

The evaluation of performance is carried out according to industry-standard methodology using a professional traffic generator. The work provides extensive benchmarks comparing the proposed design to alternative solutions.

Evaluation of the part of the dissertation concerning the discussion of research results

Research results are discussed for each individual contribution at the end of Chapters 4 and 5 and for the whole work in Chapter 6. The discussion is well structured. The work identifies three clear research questions to which the dissertation answers by providing the evidence collected in Chapters 4 and 5. The answer to the first question (p. 127) is quantitative and based on the evidence collected in the previous chapters. The answer to the second and third questions are qualitative and based on the lessons learned during the implementation of the prototypes.

Information concerning the practical application of the research results obtained

The research results have immediate practical applications. The prototypes are available to other researchers to develop new ideas. The dissertation results are general enough to be applicable also to new and ongoing projects developing alternative solutions to the problem of software switch programmability.

Information on possible irregularities which appeared in the evaluated dissertation

No irregularities appear in the dissertation.

Assessing whether the dissertation provides an original solution to a scientific problem

The dissertation addresses a significant research question that attracted several researchers in recent years, namely what performance can be expected by software switches and what is the best abstraction that can be used to dynamical program software switches. The dissertation addresses these research questions by providing original implementations and showing that the P4 abstraction results in a small performance gap. This is evidence enough to prove that the P4 abstraction is good, within the limits discussed in the conclusion.

A critique that can be moved to this approach is that the limitations of P4 was designed as a hardware abstraction and some of its limitations can be lifted in a different abstraction layer designed for software switches.

Assessing whether the PhD thesis demonstrates the candidate's overall theoretical knowledge of the discipline or disciplines and his or her ability to carry out scientific or artistic work independently

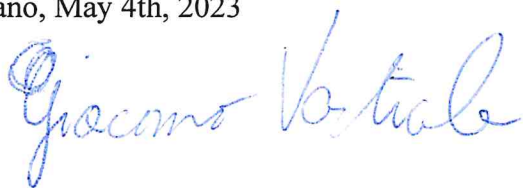
The thesis demonstrates extensive knowledge of the field of network programmability and of networking in general. The candidate shows ability to carry out independent research.

In the case when the Contractor states that the dissertation deserves to be distinguished, the justification for this conclusion should be indicated.

This reviewer thinks that the dissertation deserves to be distinguished for the following reasons:

- (1) The research questions are clearly formulated and the dissertation presents a methodology to derive the answers in a logical and formal way from the evidence collected from the prototypes.
- (2) The two prototypes are well designed showing an in-depth knowledge of the internal mechanisms of software switches, their limitations and the mechanisms to overcome them.
- (3) The design of the research leverages an in-depth analysis of the most recent and relevant literature, positioning the work in a fruitful research field.

Milano, May 4th, 2023

A handwritten signature in blue ink that reads "Giacomo Vertale". The signature is written in a cursive, flowing style.

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji

INSTYTUT TELEKOMUNIKACJI

Dr hab. inż. Piotr CHOŁDA

Kraków, dn. 5 maja 2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Tytuł rozprawy: Data Plane Programmability for Software Datapaths in a Virtualized Network Infrastructure
Autor rozprawy: mgr inż. Tomasz Piotr Osiński

1. WSTĘP

Rozprawa pt. „Data Plane Programmability for Software Datapaths in a Virtualized Network Infrastructure” autorstwa p. mgra inż. Tomasza Piotra Osińskiego, została napisana w języku angielskim pod opieką promotora p. dr hab. inż. Haliny Tarasiuk. Rozprawa liczy 169 stron i obejmuje w warstwie merytorycznej: „Abstract”, „Streszczenie”, rozdział wprowadzający „Chapter 1: Introduction” (str. 15-24), rozdział opisujący koncepcyjne „Chapter 2: Background” (str. 25-57), uzasadnienie prowadzonych badań „Chapter 3: Need for programmable SDN software switch” (str. 59-70), dwa rozdziały stanowiące główny trzon oryginalnej koncepcji prezentowanej w rozprawie „Chapter 4: P4rt-OVS: Programming Protocol-Independent, Runtime Extensions for Open vSwitch with P4” (str. 71-93) oraz „Chapter 5: NIKSS: A novel programmable software datapath for Software-Defined Networking” (str. 95-122), następnie podsumowanie „Chapter 6: Summary” (str. 123-130), dwa dodatki – na temat metodologii pomiarów „Appendix A: Methodology to measure per-component CPU cycles for NIKSS” (str. 131-133) i „Appendix B: Online DDoS mitigator with P4rt-OVS” (str. 135-138), na koniec spis literatury „Bibliography” (str. 139-162) oraz spisy tabel, rysunków, wydruków kodu (listingów), listę skrótów.

2. CEL BADAŃ (W ODNIESIENIU DO TEZY ROZPRAWY). Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? CHARAKTER ROZPRAWY. Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Doktorant postawił sobie jako cel opracowanie oryginalnego rozwiązania konstrukcyjnego (a właściwie dwóch takich rozwiązań), które umożliwi w sposób programowalny implementację płaszczyzny przekazu danych (ang. *data plane*). Płaszczyzna danych ma służyć obsłudze podstawowych funkcji przełączników programowalnych (nazywanych w rozprawie przeważnie z użyciem tytułowego słowa **Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji**
Instytut Telekomunikacji
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,
tel. +48 12 617 39 37, fax +48 12 634 23 72
e-mail: kt@agh.edu.pl, www.agh.edu.pl

„datapath”), czyli głównych elementów składowych sieci sterowanych programowo (ang. *software-defined networks*), przy czym mają one działać w zwirowalizowanym środowisku teleinformatycznym. Tak zdefiniowana tematyka jest aktualna; potencjalnie wyniki prac mogą znaleźć zastosowanie w wielu obszarach (np. tworzenie centrów danych). Jest również nietrywialna, gdyż Doktorant podszedł do tematu od strony czysto konstrukcyjnej, implementując dwa rozwiązania programistyczne: P4rt-OVS, które stanowi rozszerzenie popularnego przełącznika programowalnego Open vSwitch w kierunku współpracy z językiem programowania sieciowego P4, jak również NIKSS, modułu programistycznego, który umożliwia obsługę pakietów w ramach jądra systemów typu Unix i opiera swoje działanie na współpracy z oprogramowaniem wspierającym obsługę ruchu, tj. eBPF (ang. *extended Berkeley packet filter*, potrzebę współpracy z akurat tego rodzaju podejściem Doktorant przekonująco wykazał w rozdziale wprowadzającym dziedzinę „Background”). Oba wypracowane rozwiązania działają w praktyce, ich wytworzenie (tj. zaprojektowanie, implementacja oraz przetestowanie) wymagało dużo pomysłowości koncepcyjnej, jak również poradzenia sobie z praktycznymi problemami informatycznymi (w tym utrzymanie w ryzach złożoności obliczeniowej, wybór odpowiednich struktur danych itp.). Praca ma więc charakter konstrukcyjny, zaś praktycznie opracowane rozwiązania są testowane doświadczalnie pod kątem uzyskanej jakości.

Przedstawione podejście zostało opracowane w kontekście badawczym, które Doktorant zdefiniował z użyciem szeregu problemów badawczych. Teza nie została przedstawiona, ale szczególnie w przypadku rozwiązania o charakterze konstrukcyjnym wydaje mi się to podejściem zasadnym. Zagadnienia badawcze, którymi zajmuje się Doktorant zostały przedstawione następująco w postaci pytań raczej niż tez (podaję we własnym tłumaczeniu z angielskiego):

- Czy programowalna płaszczyzna danych oraz język P4 mogą być skutecznie wykorzystane do tworzenia programowalnych przełączników bez utraty wydajności?
- Biorąc pod uwagę skoncentrowanie na sprzęcie, czy język P4 jest wystarczająco elastyczny, aby zaprogramować w nim wszystkie funkcjonalności niezbędne do implementacji typowych zwirowalizowanych funkcji sieciowych?
- Czy związana z językiem programowania sieciowego P4 architektura przełącznika (PSA, ang. *portable switch architecture*) jest odpowiednia do użycia w przypadku przełączników programowalnych i z jakim wiąże się to kosztem?

Pytania te są zasadne, tym bardziej że Doktorat stawia je już po przedstawieniu postulatów, które mają być spełnione przez opracowywane rozwiązania (nieco więcej na ten temat piszę w następnym punkcie recenzji). Odpowiedź na te pytania jest generalnie pozytywna, gdyż udało się uzyskać efektywne rozwiązania.

Jako takie, **zagadnienia (pytania) badawcze są przedstawione jasno i przekonująco. Nie ma wątpliwości, że ich rozwiązanie jest pożądane.**

3. SPOSÓB PRZEPROWADZENIA ANALIZY ŹRÓDEŁ. SPOSÓB SFORMUŁOWANIA WNIOSKÓW WYNIKAJĄCYCH Z ANALIZY ŹRÓDEŁ. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadcząco

o dostatecznej wiedzy Autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Doktorant nie zdecydował się na przeprowadzenie analizy źródeł w ramach wyróżnionego rozdziału poświęconego podsumowaniu badań literaturowych. Stanowi to pewną wadę pracy, przed wszystkim z punktu widzenia czytelności opracowania tła. Z drugiej strony, absolutnie nie mam wątpliwości, że aktualna literatura światowa na odpowiedni temat jest znana Doktorantowi, który dokładnie się z nią zapoznał i wysnuł z niej odpowiednie wnioski. Bibliografia pracy obejmuje 195 pozycji anglojęzycznych, w przeważającej większości jak najbardziej aktualnych. Analiza literaturowa jest obecna, tylko że w sposób rozproszony – głównie w rozdziale wprowadzającym kontekst technologiczny „Background”, rozdziale stanowiącym uzasadnienie potrzeby prowadzenia badań „Need for programmable SDN software switch” oraz w podrozdziałach uzasadniających koncepcje projektowe obu rozwiązań programistycznych, tj. P4rt-OVS oraz NIKSS). Doktorant w sposób przekonujący wywodzi z literatury, że przyjęte przez niego założenia są słuszne, przedstawia problemy do rozwiązania, jak również potwierdza ogromną wiedzę praktyczną związaną z tematyką doktoratu. W szczególności w ramach tab. 3.1 przekonująco zestawia właściwości opracowanych przez niego rozwiązań na tle konkurencyjnych podejść raportowanych w literaturze. Byłoby zasadne również zestawić tego rodzaju rozwiązania nie w odniesieniu do całych implementacji, ale także konkretnych koncepcji składowych, bo przecież takie rozstrzygnięcia Doktorant podejmował. Np. w podrozdziale 5.2.5 Doktorat dyskutuje wybór algorytmu dopasowania w ramach przeglądu tablic. Nie neguję dokonanego przez niego wyboru, natomiast jasny przegląd literatury z czytelnym ilościowym porównaniem różnych algorytmów byłby zapewne bardziej przekonujący.

Obecna w pracy analiza literaturowa jest na dobrym poziomie i została wykonana właściwie, tyle że musi być poszukiwana przez czytelnika po całej pracy doktorskiej. Podana przez Doktoranta literatura jest kompletna. Przedstawiona **analiza literaturowa wskazuje na wiedzę Autora rozprawy w zakresie obszaru objętego badaniami**, jak również pokazuje, że umie on krytycznie podejść do materiału literaturowego.

4. ROZWIĄZANIE PRZEDSTAWIONEGO ZADANIA, WŁAŚCIWOŚCI PRZYJĘTYCH METOD I ZAŁOŻEŃ. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Doktorant używa deklaratywnego języka programowania sieciowego P4, który służy jako język deklaratywny, mający na celu opisanie sposobu przetwarzania całego stosu protokołów obsługującego ruch przez programowalne urządzenia sieciowe. W tym przypadku Doktorant nastawia się przede wszystkim na obsługę przełączników. Deklaratywny charakter języka umożliwia programowanie przełączników bez posiadania dogłębnej i specjalistycznej wiedzy na ich temat, gdyż opracowany kompilator służy przetłumaczeniu deklaracji na sposób działania obsługiwany przez systemy typu Unix (a dokładnie chodzi o użycie pseudo-urządzenia eBPF). Działanie przedstawionych rozwiązań jest szybkie, co z jednej strony zostało uzasadnione przez wprowadzenie konkretnych koncepcji na poziomie projektu, a z drugiej jest może nie tyle ściśle dowiedzione, co przekonująco

potwierdzone przez eksperymenty mające na celu pokazanie konkurencyjnego (w stosunku do innych rozwiązań) narzutu czasowego, które wprowadza.

Zgadzam się z Autorem rozprawy, że najważniejszy wkład to dwie opracowane przez niego implementacje: rozszerzenie przełącznika Open vSwitch (P4rt-OVS) oraz oryginalny przełącznik NIKSS. Słowa implementacja nie należy rozumieć deprecjonująco – są to całościowe i twórcze koncepcje obsługi ruchu teleinformatycznego, tj. Doktorant z jednej strony musiał zaproponować rozwiązania na poziomie mechanizmów, a z drugiej strony musiał je zaprojektować w taki sposób, żeby efektywnie działały z punktu widzenia praktycznego (co wymagało np. zmierzenia się z problemami dotyczącymi złożoności przetwarzania zapytań itp.). Przedstawione podejście jest spójne. Rozwiązanie NIKSS nie jest wprawdzie rozszerzeniem P4rt-OVS, ale jest oczywiste że opracowanie tego drugiego pomogło w rozwiązaniu kwestii szczegółowych przy projektowaniu i testowaniu tego pierwszego.

Rozprawa jest napisana z dużym znawstwem dziedziny i w sposób umożliwiający czytelnikowi docenienie uzyskanych wyników. Doktorant czytelnie uzasadnia przyjęte założenia (służy temu głównie rozdział „Chapter 3: Need for programmable SDN software switch”, jak również fragmenty rozdziałów „Chapter 4” i „Chapter 5”, w których opisuje poszczególne zagadnienia, które należało rozwiązać, przy czym poziom zaufania do przedstawionych rozstrzygnięć jest zwiększony w oparciu o literaturę przedmiotu). Poza opisem ogólnego tła programowalności oraz wirtualizacji zasobów sieciowych Doktorant opisuje w rozdziale „Chapter 1: Introduction” postulaty dotyczące proponowanych przez niego później rozwiązań. Dotyczą one możliwości użycia deklaratywnego języka wysokiego poziomu, dzięki czemu będzie można w sposób potokowy przetwarzać pakiety danych z użyciem podejścia programowalnego. Tworzone potoki mają być dostosowane do potrzeb użytkownika w taki sposób, żeby nie była wymagana głęboka wiedza dotyczące technik przetwarzania pakietów. Tego rodzaju postulat jest jak najbardziej zasadny i jego spełnienie umożliwiłoby dużą aplikowalność elastycznych rozwiązań sieciowych, których oczekuje się po wszelkich rozwiązaniach związanych z konstrukcją zwirtualizowanych funkcji sieciowych, co jest częścią koncepcji nadchodzących rozwiązań z zakresu sieci 5G. Doktorant zrealizował przynajmniej częściowo ten postulat, chociaż – jak sam trzeźwo i uczciwie stwierdza – nie zrobił tego w pełni (np. nie skupiał się na możliwości realizacji rozwiązań z zakresu bezpieczeństwa, zresztą być może nie byłyby one na teraz w ogóle możliwe). Trzeba jednak pamiętać, że realizacja takiego postulatu w 100% po pierwsze może być raczej traktowana jako pewien ideał, a po drugie jest zadaniem dla wielkich zespołów i to rozłożonym na lata pracy. Pewne elementy rozumienia postulatów są doprecyzowane w rozdziałach „Chapter 2” i „Chapter 3”, w których Doktorant opisał na przykład, w jaki sposób zamierza rozumieć „jakość” (także w obrębie metodologii prac eksperymentalnych) oraz jakiego rodzaju przypadki użycia funkcjonalności są interesujące i pożądane. W praktyce Doktorant konstruuje dwa przełączniki programowalne, które opierają na definiowaniu potoków przetwarzania pakietów z użyciem języka P4. Pierwszy z nich to rozszerzenie uznanego przełącznika Open vSwitch (przedmiot rozdziału „Chapter 4: P4rt-OVS: Programming Protocol-Independent, Runtime Extensions for Open vSwitch with P4”), a drugi z nich to niezależny przełącznik przedstawiony w rozdziale „Chapter 5: NIKSS: A novel programmable software datapath for Software-Defined Networking”.

Za najbardziej wartościowy aspekt pracy uważam jakość rozwiązań przemyślanych na potrzeby opracowanego oprogramowania prototypowego, które

pozwalają potraktować je jako udane i kompleksowe implementacje spełniające wspomniane postulaty, które na poziomie potencjału aplikacyjnego zostały uzasadnione w rozdziale „Chapter 3: Need for programmable SDN software switch”. I tak w ramach opracowania przełącznika P4rt-OVS („Chapter 4”) Doktorant zaprojektował, a następnie wdrożył rozszerzenie przełącznika OVS, przy czym oparł się na języku programowania sieciowego P4, który służy do skonfigurowania przetwarzania pakietów w systemach typu Unix (działający w przestrzeni użytkownika BPF). Doktorant napisał kompilator z P4 na BPF, dzięki czemu opracowane w języku P4 programy mogą być uruchamiane w maszynie wirtualnej BPF (rozwiązanie zyskało uznanie organizacji odpowiedzialnej za rozwój języka P4 i jest częścią oficjalnego oprogramowania). Poza rozwiązaniem zagadnień organizacji przetwarzania danych i współpracy różnych elementów składowych główny cel, który przyświecał Doktorantowi, to zapewnienie wydajności działania, czego dowodzi z użyciem serii eksperymentów porównawczych (w tym między innymi Autor pokazuje, że niezbędny dodatkowy narzut w stosunku do obecnego modelu przetwarzania w OVS nie jest istotny). W tym rozdziale (jak i następnym) głównie wskaźniki jakościowe dotyczą efektywności działania i opierają się na pomiarach liczby użytych cykli procesora na przetwarzany pakiet oraz na uzyskiwanej przepustowości. Są to dobrze dobrane wskaźniki. Same scenariusze badawcze są przekonujące i można je uznać za trafne wykazanie eksperymentalne użyteczności rozwiązania (uwagi te dotyczą również badań odnoszących się do NIKSS, o czym niżej).

Następnie w oparciu o doświadczenie pozyskane na podstawie P4rt-OVS Doktorant opracował odrębny przełącznik programowalny NIKSS (opisany w „Chapter 5”), który korzysta z abstrakcyjnej architektury przełącznika programowalnego PSA (ang. *portable switch architecture*) w połączeniu z eBPF. Rozwiązanie zostało opracowane w sposób elastyczny (dwa sposoby przetwarzania danych w zależności od potrzeb funkcjonalnych i jakościowych), wspiera algorytm klasyfikacji pakietów, również opiera się na użyciu oryginalnego kompilatora P4, tym razem na eBPF. Jakość działania również została potwierdzona serią eksperymentów. Tutaj dodano w ramach testów jeszcze kolejny aspekt jakościowy: opóźnienie, jak również poprawiono metodologię badań eksperymentalnych, co wskazuje na rozwój koncepcyjny w miarę prezentowanych w rozprawie wyników (jest to zapewne też pochodną rozwoju prac wykonywanych w ramach realizacji doktoratu na przestrzeni lat).

Z cech pozytywnych warto wspomnieć ponadto dwa różne aspekty:

- Ze względu na duży nacisk kładziony na zagadnienia programowalności oraz praktyczne kwestie implementacyjne, Doktorant nieco uwagi poświęca również analizie złożoności różnych operacji oraz efektywnych struktur danych (głównie przeszukiwania tablic oraz dopasowania wzorców). Dobrze, że te zagadnienia znalazły się w pracy (mimo że posłużyły nie tyle do wynalezienia nowych algorytmów, co do zdecydowania, które z wcześniej opracowanych należy wybrać), która dobrze wpisuje się nie tylko w zagadnienia telekomunikacji, ale też informatyki technicznej.
- Oba rozwiązania są otwarcie kodowe i zostały udostępnione w repozytorium Github, co podnosi transparentność rozwiązania i może służyć wszelkim zainteresowanym.

Finalnie, Doktorant jest gotowy do odpowiedzi na zadane na początku pytania (co czyni w podsumowaniu „Chapter 6”):

- Czy programowalna płaszczyzna danych oraz język P4 mogą być skutecznie wykorzystane do tworzenia programowalnych przełączników bez utraty wydajności?

W tym przypadku udzielona odpowiedź opiera się na pozytywnych wynikach eksperymentów z opracowanymi przełącznikami. Zarówno P4rt-OVS jak i NIKSS pełnią zamierzone funkcje dzięki użyciu języka P4, a ich parametry jakościowe są na oczekiwanym poziomie (a w każdym razie nie wnoszą istotnych obciążeń w stosunku do rozwiązań konkurencyjnych). Tutaj Autorowi udało się uzyskać pełny sukces.

- Biorąc pod uwagę skoncentrowanie na sprzęcie, czy język P4 jest wystarczająco elastyczny, aby zaprogramować w nim wszystkie funkcjonalności niezbędne do implementacji typowych zwirtualizowanych funkcji sieciowych?

Tutaj sam Doktorant przyznaje, że duża grupa funkcjonalności jest możliwa do realizacji, chociaż niekoniecznie wszystkie (np. związane z zabezpieczeniem opartym na szyfrowaniu w urządzeniach klienta końcowego). Doceniam trzeźwe i uczciwe postawienie sprawy. Moim zdaniem Doktorant i tak pokazał, że duża część istotnych funkcji (np. związanych z kształtowaniem ruchu) jest realizowalna i sam fakt, że podstawowa możliwość realizacji połączeń oraz ich obsługi da się uzyskać z użyciem przedstawionych rozwiązań, stanowi duży sukces. Można nawet powiedzieć, że postawienie sobie celu w postaci uzyskania wszystkich funkcjonalności jest przesadnym maksymalizmem ze strony Autora rozprawy.

- Czy związana z językiem programowania sieciowego P4 architektura przełącznika (PSA, ang. *portable switch architecture*) jest odpowiednia do użycia w przypadku przełączników programowalnych i z jakim wiąże się to kosztem?

Odpowiadając na to pytanie, Doktorant stwierdza, że udało się to częściowo, gdyż przedstawione przez niego rozwiązanie NIKSS realizuje właśnie model PSA. Ze wskazanych w ramach odpowiedzi na poprzednie pytanie względów wiadomo, że są funkcjonalności, które przynajmniej na razie muszą być realizowane poza architekturą. Ponownie muszę stwierdzić, że maksymalizm zagadnienia pierwotnie sformułowanego przez Doktoranta jest nadmierny i samo wykazanie z użyciem przedstawionych konstrukcji oraz eksperymentów, że duża część funkcjonalności jest realizowalna stanowi istotne osiągnięcie. Podobnie zresztą jak skuteczne wskazanie braków, które otwierają drogę do dalszych badań, a poza tym uczciwie i realistycznie wskazują na ograniczenia użytego podejścia. Doktorant postuluje zresztą potrzebę poszukiwania poszerzonej architektury. Bez wątplenia jest to jednak tematyka na zupełnie oddzielne, duże badania. Moim zdaniem sposób realizacji doktoratu również w odniesieniu do tego trzeciego zagadnienie badawczego zakończył się bynajmniej nie połowicznym sukcesem. W ogólności dojrzałe podejście do własnych wyników jest dużą zaletą tekstu przygotowanego przez Doktoranta, który na koniec podsumowania definiuje niebanalne zagadnienia postulowane do dalszej pracy.

Stwierdzam więc, że Autor istotnie **zrealizował postawione sobie nietrywialne zadania**, co wymagało dużo kreatywności oraz niezwykle dokładnej wiedzy na temat sposobów działania wielu elementów składowych służących obsłudze stosu protokołów, jak również znajomości szczegółowych rozwiązań pozwalających zrealizować poszczególne bloki funkcjonalne według paradygmatu programowalności sieci.

W pracy nie zauważyłem błędów rzeczowych poza jednym, który nie rzutuje istotnie na jakość samego rozwiązania, ale stanowi co najmniej nieścisłość opisu.

Otóż w zakresie badań eksperymentalnych opisywanych w rozdziale poświęconym P4rt-OVS („Chapter 4”) Doktorant odnosi się do kwestii wiarygodności statystycznej prezentowanych wyników. Są one opisywane z użyciem 95% przedziałów ufności uzyskanych w wyniki 10-krotnych powtórzeń. Dodatkowo Doktorant pisze w przypisie nr 2: „We assume that the sampled values follow a normal distribution to be able to compute the confidence interval from estimated means and standard deviations.” (str. 82). To stwierdzenie jest w ogóle skrótowe i nie do końca jasne, w związku z czym nasunęły mi się trzy wątpliwości. Po pierwsze, trudno przyjąć takie założenie (nt. rozkładu normalnego) od strony statystycznej bez przeprowadzenia odpowiedniego testu lub testów normalności. Po drugie, możemy zasadnie przyjmować, że jeśli poszczególne przebiegi są uśredniane, jest ich dużo i nie zależą od siebie, to średnia z nich uzyskana ma rozkład normalny na podstawie Centralnego Twierdzenia Granicznego; ale znowu – niekoniecznie same próbki pochodzą z rozkładu Gaussa. Po trzecie, jeśli uśrednia się wyniki z 10 przebiegów, to powinno się posługiwać raczej bardziej uniwersalną statystyką niż oparta na rozkładzie normalnym (mianowicie opartą na rozkładzie *t*-Studenta). W odniesieniu do wyników pokazanych w tym rozdziale może to mieć wpływ na zwiększenie (być może istotne) przedziałów ufności, które np. na rys. 4.7 i 4.8 już teraz nie są zaniedbywalne. Na pewno warto było tę kwestię dokładniej przedyskutować w doktoracie.

Po stronie wad można również wskazać, że całość analizy dotyczącej aspektu funkcjonalności ma głównie charakter werbalnej dyskusji wskazującej na przewagę uzyskanego rozwiązania nad innymi podejściami. Doktorant nie pokusił się niestety o próbę zdefiniowania mierzalnych wskaźników, które mają w świecie nauk technicznych moc większego przekonywania (a byłoby to interesujące np. w odniesieniu do definiowania kluczowych w rozdziale „Chapter 3” właściwości co najmniej „abstrakcji programistycznej”, „programowalności” czy „operacyjności”). Nie wykluczam, że np. dałoby się w kontekście „abstrakcji” jakoś skwantyfikować fakt zwiększenia możliwości przetwarzania pakietów w połączeniu z łatwością obsługi językowej w rozumieniu kodu oprogramowania (np. z użyciem zmniejszenia wymaganych linii kodu? a może pamięci wymaganej do obsługi określonego typu funkcji zwirtualizowanych?). Zastanawiam się nad taką opcją choćby z tego względu, że w takim przypadku być może dałoby się modelować zachowanie opracowanych rozwiązań z użyciem podejścia teoretycznego, które daje pole do generalizacji wyników. Doktorant w ogóle nie poszedł tą ścieżką, co byłoby zapewne pożądane z punktu widzenia naukowego. Zostawiam to jednak jako pewien otwarty problem, być może do dyskusji w ramach obrony.

5. ORYGINALNOŚĆ ROZPRAWY, SAMODZIELNY DOROBEK AUTORA, POZYCJA ROZPRAWY W STOSUNKU DO STANU WIEDZY (POZIOM TECHNIKI) PREZENTOWANEGO W LITERATURZE ŚWIATOWEJ. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową? PRZYDATNOŚĆ ROZPRAWY DLA NAUK TECHNICZNYCH, PRZEMYSŁU, OBRONNOŚCI KRAJU ITP.

Rozprawa została zrealizowana pierwotnie w ramach współpracy z Orange Labs, potem organizacją ONF (Open Networking Foundation), a wyniki są dostępne publicznie: w formie repozytorium na Github (w tym w ramach elementów

składowych oficjalnych rozwiązań dla języka P4), jak również w formie publikacji w cenionych periodykach oraz w formie referatów na cenionych konferencjach. To nie dziwi, ponieważ **Doktorant rozwiązał oryginalnie szereg problemów praktycznych**, dzięki którym przedstawił funkcjonalne rozwiązania zapewniające obsługę programowalnych przełączników, co obecnie jest jednym z najistotniejszych rozwiązań w zakresie technik sieciowych w warstwie 3 i 4. Doktorant wykazał, że przedstawione przez niego rozwiązania są konkurencyjne na tle innych porównywalnych podejść konkurencyjnych.

W zakresie odbioru w świecie akademickim na uznanie musi zasługiwać dorobek publikacyjnych, przy czym za najistotniejsze z tego punktu widzenia wskazałbym publikacje: referaty na uznanych konferencjach *CoNEXT'22*, *Networking'20* i *NetSoft'19* (są to konferencje branżowe o dużej widoczności, bardzo dobrze dopasowane do prezentacji wyników związanych z dziedziną doktoratu) oraz z magazynie *IEEE Network*. Wyciąg z tej publikacji jest zresztą przedmiotem dodatku B (pokazano użycie P4rt-OVS), który jako przykład użycia nie został włączony przez Autora do głównej części pracy, co wskazuje na wyraźną chęć oddzielenia wyników własnych od wyników uzyskanych w szerszej grupie projektowej. Przede wszystkim wyniki dotyczące P4rt-OVS zostały zaprezentowane w niezwykle prestiżowym periodyku telekomunikacyjnym *IEEE Transactions on Network and Service Management*.

Rozprawa jest **przydatna przede wszystkim z punktu widzenia przemysłu** jako propozycja konkretnych rozwiązań konstrukcyjnych. Zostały one wdrożone, cały kod jest publicznie dostępny – oba przedstawione rozwiązania mogą zatem być stosowane w praktyce, jak również testowane przez przedstawicieli branży sieciowej. Z punktu widzenia rozwoju nauk technicznych, tj. dyscypliny informatyki technicznej i telekomunikacji, przedstawione wyniki mają charakter głównie prototypów i chociaż prezentują oryginalne podejście, w ramach którego opracowano dużo szczegółowych koncepcji, Doktorant skupiał się przede wszystkim na twórczej integracji różnego typu algorytmów, co jest bardzo cenne.

6. POPRAWNOŚĆ PRZEDSTAWIENIA UZYSKANYCH WYNIKÓW. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Praca jest napisana po angielsku, w sposób **niezwykle staranny z punktu widzenia językowego, ale też edycyjnego**. Nie znalazłem literówek i natrafiłem na nieliczne potknięcia gramatyczne. Prowadzony wywód jest czytelny, przekonujący oraz poprawny z punktu widzenia logiki i jasności prezentacji. Praca jest długa, ale dokładny opis wielu szczegółów technologicznych wymagał wielu stron, na pewno tekst jest zwięzły. Doceniam pomysłowość oraz przejrzystość stosowanych rysunków, które istotnie pomagają w zrozumieniu przedstawianych koncepcji.

Poniżej podaję kilka dostrzeżonych potknięć o charakterze redakcyjnym, ale jest ich niezwykle mało i na pewno nie stanowią one wady rozprawy:

- Stosowanie słowa „warstwa” jako odpowiednika „plane” (przeważnie tłumaczone jako „płaszczyzna funkcjonalna” w odróżnieniu od warstwy technologicznej).

- Stosowanie w języku polskim odmienianego słowa „switch” jako odpowiednika angielskiego słowa „switch” (bardziej zasadne byłoby stosowanie określenia „przełącznik”, ewentualnie konsekwentnie spolszczenie słowa „switch”).
- Niekonsekwencja w zastosowaniu wielkich i małych liter w tytułach rozdziałów.
- Nie w pełni konsekwentnie skompilowana lista skrótów, np. używany jest skrót DSL, ale nie został on umieszczony na tej liście.
- Zamieszczanie tytułów tabel pod nimi (zamiast powyżej nich).
- Stosowanie łącznika w miejsce myślnika (np. str. 11).
- Pisanie nazwy sekcji z odpowiednim numerem od małej litery (np. str. 31).
- Brak użycia kursywy matematycznej w odniesieniu do zmiennych W (np. str. 36).
- Niepełny opis bibliograficzny książki w pozycji bibliografii [44].
- Bywają przypadki w bibliografii, gdzie w tytułach pogubiono wielkie litery w skrótowcach (np. pozycje [69], [70], [112]).

W ogólności chcę jednak podkreślić, że rzadko widuje się w ostatnich czasach tak poprawnie zredagowane rozprawy doktorskie.

7. SŁABE STRONY ROZPRAWY, JEJ GŁÓWNE WADY. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

W ogólności nie widzę istotnie słabych stron rozprawy. Do niektórych aspektów, które mogłyby zostać lepiej przeprowadzone odniosłem się wcześniej, tutaj wskażę tylko podsumowująco trzy punkty:

1. Brak wyróżnionego rozdziału poświęconego analizie literaturowej, który w sposób scentralizowany przedstawiałby opis literaturowy oraz porównanie różnych rozwiązań szczegółowych. Przysłużyłoby się to z jednej strony poprawie czytelności pracy doktorskiej, a z drugiej strony podniosłoby jakość dyskusji nt. konkretnych decyzji konstrukcyjnych podjętych przez Doktoranta.
2. Nadmiernie skrótowy i pozostawiający niejasności lub co najmniej niedopowiedzenia od strony metodologicznej opis badania wiarygodności statystycznej wyników.
3. W zakresie analizy nowości i jakości proponowanych rozwiązań byłoby zasadne:
 - a. Zdefiniowanie już od początku wskaźników ilościowych, które opisują pożądane cechy jakościowe. Obecnie uzasadnienie ma charakter werbalnego dyskursu zalet, gdyby jednak dało się je ująć na poziomie liczbowym (co zresztą pośrednio ma miejsce, gdy Doktorant przedstawia i dyskutuje wyniki eksperymentalne odnoszące się do działania opracowanych rozwiązań) poziom przekonania nt. wysokiej jakości rezultatów byłby zapewne wyższy.
 - b. Uzasadnienie wysokiej jakości uzyskanych rezultatów ma charakter czysto eksperymentalny, co oczywiście jest koniecznym elementem badań w dziedzinie informatyki technicznej i telekomunikacji. Szkoda, że Doktorant nie pokusił się o chociaż śladową analizę potencjału z punktu widzenia modelowania teoretycznego, które ma dużą wartość

poznawczą, a także daje możliwość uzyskania niezaprzeczalnego argumentu na temat zasadności wprowadzonych w życie pomysłów.

Opisane tutaj słabsze strony nie podważają bardzo wysokiej oceny rozprawy.

8. PODSUMOWANIE (CZY ROZPRAWA SPEŁNIA WYMAGANIA PRZEZ OBOWIĄZUJĄCE PRZEPISY). OCENA ROZPRAWY. Do której z kategorii Recenzent zalicza rozprawę?

Rozprawa prezentuje oryginalne rozwiązanie w burzliwie rozwijającym się obszarze współczesnej telekomunikacji, przy czym programistyczny charakter rozwiązania niezaprzeczalnie lokuje ją w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Co więcej, rozprawa jest o tyle nietypowa, że Doktorant zdecydował się na czysto konstrukcyjne rozwiązanie, które mu się bezapelacyjnie powiodło, potwierdzając jego wysokie kompetencje i znanstwo w zakresie rozwiązań z zakresu sieci programowalnych. Z mojego doświadczenia wynika, że uzyskanie sukcesu w zakresie rozwiązań praktycznych o uznaniu międzynarodowym nie jest częste, nawet w odniesieniu do doktoratów nastawionych na wdrożenia. Jako taka rozprawa spełnia więc wymagania odnoszące się do obowiązujących przepisów w zakresie prac doktorskich (oryginalność i użyteczność rozwiązania oraz potwierdzona wiedza Doktoranta w przedmiotowym obszarze). Ponadto rozprawa i związane z nią publikacje naukowe dowodzą, że Doktorant posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W mojej opinii praca jest wybitnie dobra i zasługuje na wyróżnienie. Wynika to z jednej strony z faktu, że uzyskane wyniki funkcjonują w naukowym obiegu międzynarodowym (zostało to potwierdzone publikacjami o dużej widoczności), jak również mają charakter praktyczny, który uzyskał uznanie (w tym włączenie w oficjalne repozytorium programistyczne organizacji odpowiedzialnej za rozwój języka P4).

Praca cenna
