

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 tło 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 Telekomunikacjial. 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 poradenia 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) świadczący

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 przemysłanych 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 zabezpieczaniem 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 zanedbywalne. 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 DOROBK 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 przedstawiałyby 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).