Gdańsk, 26.11.2015 r.

prof. dr hab. inż. Józef Woźniak, prof. zw. PG
Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki
Katedra Teleinformatyki
Politechnika Gdańska

Recenzja pracy doktorskiej mgra inż. Piotra Boryło pt. "Provisioning of Energy-Aware Cloud Services Over Optical Networks"

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez Autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Opiniowana praca jest poświęcona zagadnieniu świadczenia usług w chmurze obliczeniowej, a zatem problematyce ważnej ale jednocześnie dość szeroko badanej w ostatnim czasie. Szczególnego charakteru nadaje jednakże opiniowanej pracy, fakt poszukiwania przez jej autora, takiej organizacji pracy sieci, która prowadzić będzie do ograniczenia zapotrzebowania na zasoby energetyczne, a dokładniej możliwości redukcji emisji dwutlenku węgla przy założeniu, że chmura obliczeniowa jest złożeniem dwóch infrastruktur utrzymywanych przez niezależnych operatorów - operatora sieci optycznej oraz dostawcę zasobów i usług obliczeniowych w centrach przetwarzania danych. Przy wyborze centrum obliczeniowego oraz oferowanej usługi (PaaS, SaaS, StaaS), o której autor zakłada, że jest świadoma źródła pochodzenia energii (wykorzystywanej do zasilania centrum), a w komutowanej sieci optycznej wykorzystywany jest routing dynamiczny pozwalający na realizację strategii kierowania ruchem typu anycast (*jeden do jednego z wielu)*. W swoim autorskim rozwiązaniu doktorant proponuje algorytmy - strategie rutingu i poszukuje zarówno schematów dopasowywania tych strategii do różnych usług oferowanych przez chmurę obliczeniową, jak także modeli współpracy pomiędzy operatorem infrastruktury obliczeniowej IT i sieci optycznej.

Poszczególne mechanizmy składowe przyjęte przez doktoranta pozwalają na spełnienie wymagań narzucanych przez architekturę chmury usytuowanej na styku działań niezależnych operatorów. Wydajność zaproponowanych mechanizmów i strategii została przebadana za pomocą symulacji komputerowej dla dwóch dość popularnych topologii sieciowych. Badaniom poddano poszczególne, proponowane w pracy mechanizmy i scenariusze ich użycia, z zastosowaniem przyrostowego podejścia przy budowie pełnej odpowiedzi odnośnie „efektywności energetycznej" w kontekście scenariuszy routingu, ich dopasowania do różnych usług oferowanych przez chmurę a także proponowanych przez autora modeli współpracy operatorów. Zastosowanie przyrostowego podejścia w tworzeniu kompletnego rozwiązania pozwala niewątpliwie lepiej zrozumieć zarówno każdy z mechanizmów składowych, jak i całe rozwiązanie. Ta swoista dekompozycja ma także pewne ograniczenia – poprzez, w szczególności doświadczalny charakter badań tracimy możliwość „formalnej" optymalizacji – z dobrze zdefiniowaną funkcją kryterialną i zestawem wymagań i ograniczeń.

Tym niemniej należy zgodzić z autorem, że dzięki takiemu podejściu mogła zostać skutecznie wyznaczona wartościowa kombinacja mechanizmów składowych.

Teza pracy, zaproponowana w brzmieniu anglojęzycznym, ma postać:

It is possible to reduce carbon dioxide emissions of a cloud infrastructure comprising data centers interconnected via optical networks using energy-aware resource provisioning strategies.

Co w tłumaczeniu autora na język polski przyjmuje formę:

Możliwa jest redukcja ilości dwutlenku węgla emitowanego przez centra danych tworzące chmurę obliczeniową połączoną siecią optyczną przez zastosowanie strategii rozkładu obciążenia uwzględniającego pochodzenie wykorzystywanej energii.

Rodzi to drobny komentarz, gdyż w wersji angielskiej podkreśla się stosowanie strategii świadomych zużycia energii, podczas gdy w wersji polskiej autor akcentuje dodatkowo świadomość pochodzenia wykorzystywanej energii (co nie do końca musi być tożsame).

Teza pracy „*It is possibile to reduce...*" jest zbyt ogólna/mało precyzyjna, a więc trywialnie łatwa do osiągnięcia (przy poprawie rezultatów nawet jedynie o ε).
Pomimo tej wyraźnej wady zaproponowanej tezy badawczej problem dostarczania na żądanie usług chmury obliczeniowej z użyciem strategii świadomych zarówno zapotrzebowania na energię jak i źródeł pochodzenia tej energii oraz z wykorzystaniem sieci optycznych jest niewątpliwie zagadnieniem nowym i zyskującym na znaczeniu dla obu grup operatorów - z racji coraz powszechniejszego korzystania z aplikacji świadczonych w chmurze oraz wykorzystania szerokopasmowych sieci optycznych. Autor zaproponował też wydzielenie funkcji sterujących pracą sieci szkieletowej z wykorzystaniem technik SDN z wydzielonymi centrami sterowania.

Proponowane w pracy rozwiązania zakładają współistnienie infrastruktury sieciowej oraz chmury. W związku z tym proponowane w pracy rozwiązania można w znacznym stopniu uznać jako potencjalnie możliwe do wykorzystania w rzeczywistych scenariuszach.

Szkoda, że autor poprzestał na bardzo opisowej formie celów pracy, nie prezentując istotnych zadań badawczych - sformułowanych, chociażby po to by wytyczyć kierunki i sposoby wykazania dość pojemnej tezy pracy.

Praca obejmuje cztery części, na które składa się 12 rozdziałów, pogrupowanych i podzielonych dalej, w sposób trójpoziomowy, na podrozdziały. W odniesieniu do struktury pracy, uzyskany czteropoziomowy układ wydaje się zbyt szczegółowy jak na opracowanie o objętości 140-150 stron.

W Rozdziale 1, definiującym założenia i sam problem badawczy, brakuje większej liczby odwołań do literatury, pozwalających na umiejscowienie/zestawienie osiągnięć pracy w relacji do rozwiązań alternatywnych (pojedyncze odwołania niestety nie wypełniają tej luki).

W kolejnych, merytorycznych rozdziałach pracy autor prezentuje:

1. **Strategie rutingu typu jeden do jednego z wielu**

Proponowane w tym fragmencie pracy rozwiązania to: *randomGreen*, *closestGreen* i *closestGreenWithPenalty*. Są one oryginalnymi propozycjami autora. Dla celów porównania autor rozważył także jako strategie referencyjne: strategię *single* (jako najprostszą), która wyznacza tylko jeden z węzłów jako docelowy (bez nadmiarowości rutingu typu *anycast)* oraz dodatkowo strategie *random* i *closest*. Wydaje się, że o ile same propozycje strategii rutingu,

proponowane przez doktoranta są ciekawe to badania związane z ich efektywnością, szczególnie przy założeniu nieograniczonych zasobów w CD mają bardzo ograniczone znaczenie i bez wielkiej szkody mogłyby być pominięte, zważywszy na kolejny fragment pracy, dotyczący dopasowania strategii rutingu do usług.

2. Schematy dopasowywania strategii rutingu do typów usług oferowanych w chmurze

W pracy zaproponowano schemat *compound* - dopasowujący strategie *anycast* do typów usług oferowanych w chmurze. Do celów porównania zdefiniowano podobnie jak poprzednio trzy referencyjne schematy dopasowywania: *closest*, *closestGreen* i *closestGreenWithPenalty*. W schematach tych wszystkie typy usług obsługiwane są przez tę samą strategię *anycast*.
Schemat referencyjny *closest* stosuje strategię *closest* do obsługi wszystkich typów usług. Jest to schemat bazowy do oceny wpływu proponowanych strategii na wydajność sieci - dla każdego typu usług ruch przenoszony jest bowiem najkrótszą dostępną ścieżką. Jednocześnie, schemat *closest* nie wprowadza żadnej preferencji węzłów *zielonych* dla któregokolwiek typu usług. Schemat *closestGreen* reprezentuje dokładnie odwrotne podejście. Zielone centra danych są ściśle preferowane przez wykorzystanie strategii *closestGreen* do obsługi wszystkich typów usług. Ostatni z referencyjnych schematów dopasowywania to najbardziej rozbudowany schemat *closestGreenWithPenalty* pozwalający na wybór centrów brązowych z oczywistą preferencją dla zielonych.

3. Modele współpracy pomiędzy operatorem sieci a dostawcą usług w chmurze

Różnice pomiędzy analizowanymi modelami współpracy wynikają głównie z ilości informacji wymienianej pomiędzy operatorem sieci a dostawcą usług. Autor zakłada, że operatorzy są świadomi niezbędności współpracy dla osiągnięcia efektywnego świadczenia usług w chmurze oraz zmniejszenia emisji dwutlenku węgla. W takiej sytuacji, kompromis polega na wymianie ściśle określonych informacji przez jasno zdefiniowane interfejsy.

Autor wspomina w tym fragmencie pracy o kompromisie (*między operatorem sieci a dostawcą usług*), przy czym niezbyt mocno akcentuje fakt, że operator sieci (infrastruktury optycznej) sam nie jest istotnie – czytaj biznesowo - zainteresowany „celami pracy". Autor założył bowiem, że sieć optyczna w nieznacznym stopniu pochłania zasoby energetyczne. Przytaczane przez autora uzasadnienie, że „*Umożliwia to pełną kontrolę nad wymienianą informacją co zwiększa atrakcyjność modeli w oczach operatorów*", jest wątpliwe (mając na uwadze głównie aspekty biznesowe w działalności operatorskiej).
Czy zatem postulat ograniczania energii - emisji CO2 - jest/ powinien być naturalnym działaniem wszystkich operatorów. Przecież w przypadku operatora sieci optycznej wydatki energetyczne są, w ocenie autora, pomijalnie małe. Czy tak jest w rzeczywistości, czy urządzenia angażowane w procesy zestawiania tras i sterowania ruchem zużywają na tyle mało energii, że można je całkowicie pominąć (szkoda, że operatorowi sieci "odebrano" możliwość minimalizacji jego kosztów).
Jak w kontekście tego i innych uwarunkowań wyglądają kwestie ekonomiczne - najistotniejsze w pragmatyce działania operatorów sieci i usług (por. modele biznesowe a nie wyłącznie proekologiczne)? Dokładniejszych odpowiedzi na takie pytanie niestety brak. Przyjęte scenariusze pracy nie do końca spełniają wspomniane modele biznesowe. W pracy brak jest bowiem wyraźnego postawienia kropki nad "i" - "interesuje nas wyłącznie ekologia - zatem głównie względy społeczne".

Niezależnie od tych pytań wydaje się, że model overlay trudno przyjąć jako referencyjny – z minimalną ilością informacji wymienianej między systemami zarządzania chmurą i centralnym

sterownikiem sieci SDN. Nie przystaje on bowiem ani do modelu pracy sieci SDN (z założenia, w tej architekturze, to raczej warstwa aplikacji ma dostarczać kontrolerowi informacje potrzebne do sterowania siecią, a nie kontroler sterować usługami w warstwie aplikacji) ani tym bardziej do sposobu zarządzania chmurą – z niezależnymi operatorami. Brak preferencji odnośnie wskazania zasobów w chmurze sprawia, że kontrolę (bardzo wątpliwą) nad chmurą oddajemy operatorowi sieci optycznej (brak w tym założeniu racjonalnych przesłanek).

Słabo uzasadnione jest także założenie o tym, że obszar chmury rozciąga się wyłącznie na pojedynczego operatora sieci optycznej (jest to założenie istotne w pracy ale mało przekonywująco opisane w rozprawie). O ile fakt rozdziału operatorów jest wystarczająco udokumentowany to kwestia pokrywania się obszarów ich działania wydaje się być bardzo wątpliwa (wymagałoby to choćby komentarza na temat scenariuszy z dwoma czy większą liczbą sterowników i współpracującymi operatorami). Jest to o tyle istotne, że w pewnym fragmencie swej rozprawy autor stwierdza, że jego badania mają praktyczne znaczenie.

Kolejne, a raczej występujące naprzemiennie rozdziały pracy (zatem w układzie nieco odmiennym niż w typowo stosowanym w pracach tego typu) poświęcone zostały ocenie poszczególnych strategii oraz analizie otrzymanych wyników.

4. Ocena strategii rutingu

Dokonując oceny strategii rutingu autor przyjął dwa założenia upraszczające. Centrom danych przyznano nieograniczoną ilość zasobów obliczeniowych, a jedyną usługą oferowaną przez infrastrukturę chmury ma być usługa *PaaS*. Zgodnie z oczekiwaniami autora każda z zaproponowanych strategii anycast powinna obniżyć prawdopodobieństwo blokady względem strategii *single*. Na szczególną uwagę, w kontekście prawdopodobieństwa blokady, zasługuje strategia *closest* zapewniająca dla zadań *anycast* najkrótszą dostępną ścieżkę optyczną, minimalizując w ten sposób zajętość zasobów sieciowych.
Efekty te prezentuje w szczególności Rys. 4.1, na którym autor przedstawił redukcję emisji CO2 osiągniętą dzięki zastosowaniu analizowanych strategii. Strategie *randomGreen* i *closestGreen* ściśle preferują *zielone* centra danych względem *brązowych*. Oferują dzięki temu największą redukcję emisji. Strategia *closestGreenWithPenalty* osiąga mniejszą redukcję niż *randomGreen* i *closestGreen*, z uwagi na słabszą preferencję węzłów *zielonych*.
Z kolei wyniki osiągane przez strategie referencyjne, *single*, *closest* i *random* są mocno zależne od lokalizacji węzłów *zielonych* w sieci. Wynika to faktu, ze wzajemne położenie *zielonych* i *brązowych* centrów danych ma wpływ na kierowanie zadań do tych centrów. Otwartym pytaniem pozostaje też arbitralny wybór węzłów sieci na lokalizację centrów danych (jedną z wątpliwości stanowi w tym przypadku wybór węzłów jako miejsc CD o nawet niskim stopniu spójności).

5. Ocena schematów dopasowywania

Dokonując, z kolei oceny użyteczności schematów dopasowywania autor zrezygnował z jednego z założeń upraszczających, przyjmując, że wszystkie trzy typy usług mogą być oferowane przez infrastrukturę chmury. W mocy pozostało natomiast założenie dotyczące nieograniczonych zasobów obliczeniowych w centrach danych - co istotnie ogranicza prawdopodobieństwo blokady – odrzucenia zgłoszenia.
Rys. 4.3 przedstawia redukcję emisji CO2 w przykładowym scenariuszu symulacyjnym, podczas gdy Rys. 4.4 prezentuje całkowite prawdopodobieństwo blokady dla tego scenariusza. Zgodnie z oczekiwaniem strategia dopasowywania *closest* niesie największą emisję CO2 spośród wszystkich analizowanych schematów. Jest to, jak zauważa autor, naturalny wynik braku jakiejkolwiek priorytetyzacji *zielonych* centrów danych względem *brązowych*.

Prawdopodobieństwo blokady zapewniane przez schemat *closest* może być jednak traktowane jako wartość odniesienia, gdyż schemat ten zapewnia przenoszenie całego ruchu w sieci najkrótszymi dostępnymi ścieżkami. Z kolei schemat *closestGreen* wprowadza ścisłą preferencję *zielonych* centrów danych dla każdego typu usług. Skutkuje to znaczącą redukcją emisji CO2 w porównaniu do schematu *closest*. Ten zysk jest jednak okupiony wyraźną degradacją wydajności sieci (wzrostem prawdopodobieństwa blokady).

6. Ocena modeli współpracy

Przy ocenie modeli współpracy zniesiono wszystkie założenia upraszające (nieograniczoność zasobów). Oznacza to, że wszystkie trzy typy usług mogą być oferowane przez infrastrukturę chmury, podczas gdy zasoby obliczeniowe dostępne w centrach danych zostały ograniczone. Aby obsłużyć zadanie związane z usługą w chmurze konieczne jest zapewnienie zarówno zasobów sieciowych jak i obliczeniowych. Modele współpracy wykorzystują przy tym schematy dopasowywania strategii *anycast* do typów usług. Analizie w tym przypadku podlega więc kompletne rozwiązanie proponowane w rozprawie. Efektywność tego rozwiązania jest zależna od wszystkich elementów składowych. W celu miarodajnego porównania modeli współpracy autor zdefiniował schematy dopasowywania z jakim poszczególne modele są zintegrowane.
Na podstawie tych rozważań przyjęto następujące pary: model *overlay* wykorzystujący schemat *closest* oraz schemat *compound* dla modeli *augmented* oraz *peer*. Na Rys. 4.5 przedstawiono redukcję CO2 emitowanego przez centra danych w przykładowym scenariuszu symulacyjnym, podczas, gdy Rys. 4.6 prezentuje całkowite prawdopodobieństwo blokady dla tego scenariusza.

Mając na uwadze dość otwartą formułę przyjętej przez doktoranta tezy badawczej należy uznać, że została ona w zasadzie dowiedziona.
Mechanizmy wchodzące w skład rozwiązania cechują się znacznym potencjałem wdrożeniowym z uwagi na fakt, że są dobrze umiejscowione w nowoczesnej architekturze chmury obliczeniowej.

Praca ma charakter doświadczalno - teoretyczny. Zaproponowane przez autora rozwiązania zostały zweryfikowane symulacyjnie.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy Autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonywujący?

W tekście rozprawy Autor przytacza 116 pozycji literaturowych, w tym 5 prac współautorskich (szkoda, że w tej grupie prac nie ma żadnej pracy własnej – jednoautorskiej).

Zapewne, jak przy każdej analizie propozycji autorskich można wskazać drobne braki. I tak np. w rozdziale 5 brakuje pełniejszego porównania proponowanych strategii z podobnymi strategiami anycast znanymi z literatury (np. z pracy K. Walkowiaka, J. Raka: Shared backup path protection for anycast and unicast flows using the node-link notation. IEEE ICC 2011). Z kolei, we wcześniejszym Rozdziale 1 zdecydowanie brakuje większej liczby odwołań do literatury, pozwalających na umiejscowienie/zestawienie osiągnięć pracy w relacji do rozwiązań alternatywnych (pojedyncze odwołania w żadnej mierze nie wypełniają tej luki).

Pomimo drobnych uwag natury raczej polemicznej należy uznać, że wnioski płynące z krytycznej analizy źródeł literaturowych, dotyczących poszczególnych zagadnień, istotnych dla pełności i spójności prezentowanych w pracy zagadnień, zostały sformułowane poprawnie.

Na tym tle autor uwypuklił także nowatorski charakter swoich osiągnięć.

3. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Rozprawa doktorska powstała w oparciu o pięć prac współautorskich wymienionych jako pozycje [15]-[19] wykazu literatury. Pomimo niepodważalnej rangi większości z nich (zwłaszcza pozycji [15] dotyczącej konferencji IEEE ICC 2014 czy [17] – konferencji IEEE GLOBECOM 2014, jak i będącej w recenzji pracy [19] zgłoszonej do czasopisma Springer Journal of Grid Computing), sumaryczna liczba prac autora, na podstawie których została napisana niniejsza rozprawa jest skromna.

Zaproponowane mechanizmy i strategie zostały przebadane za pomocą symulacji komputerowej w dwóch klasycznych topologiach sieciowych: sieci NSF i ItalyNet.

Nie ulega wątpliwości, że metody symulacji komputerowej są powszechnie stosowane i akceptowane. Tym niemniej próba zdefiniowania problemu, z jego funkcją kryterialną oraz ograniczeniami byłaby w tym przypadku wskazana. Poddawanie badaniom kolejnych mechanizmów, składających się na całość problemu, tj. stosowanie metody przyrostowej ma oczywiście także swoje uzasadnienie.

Można zatem stwierdzić, że zarówno przyjęta przez autora metodologia, jak i przeprowadzona przez niego krytyczna analiza proponowanych rozwiązań (weryfikacja poprawności tych modeli), są poprawne.

4. 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?

Autor wywiązał się poprawnie ze sformułowanego w pracy zadania badawczego, którego głównym celem było ograniczenie zużycia energii w środowisku chmury obliczeniowej z centrami danych połączonymi siecią optyczną.

Na podstawie analizy zawartości pracy można w niej wskazać szereg ciekawych i bardzo wartościowych wyników, w szczególności:

1. Zaproponowanie pełnej architektury nowoczesnego rozwiązania chmurowego, w którym zasoby aplikacyjne - obliczeniowe chmury i zasoby sieciowe są zarządzane przez odrębne podmioty. *Na propozycję składają się modele sieciowe i infrastruktury IT (chmury), z czym związane są 3 dalsze modele oferowanych usług.* W tym kontekście przepływy żądań w chmurze reprezentują dostarczanie usług na żądanie.
2. Sformułowanie problemu routingu dynamicznego typu anycast (randomGreen, closestGreen i closestGreenWithPenalty) w sieciach optycznych z dostarczaniem świadomych energochłonności usług chmury, ich zbadanie oraz porównanie ze strategiami odniesienia. *Z uwagi na fakt, że strategie routingu są w pełni propozycjami autorskimi należy je ocenić bardzo wysoko.*
3. Przebadanie zróżnicowanych strategii anycast pod kątem ich dopasowania do różnych typów usług udostępnianych przez środowisko chmury. *W tym przypadku szczególnie wysoko należy ocenić model compound.*
4. Zdefiniowanie, przebadanie i porównanie modeli współpracy pomiędzy operatorami sieci i

infrastruktury IT, obejmujących:
- modele sieci nakładkowej (ovelay model) i rozszerzonej (augmented model) - traktowane jako intuicyjne modele współpracy;
- model typu peer.

Innym ważnym osiągnięciem jest też niewątpliwie:
5. Budowa dedykowanego - niestandardowego - narzędzia do symulacji z wykorzystaniem symulatora OMNeT++ oraz przeprowadzenie rozległych badań symulacyjnych dla wszystkich proponowanych mechanizmów, z zastosowaniem podejścia przyrostowego pozwalającego na pełniejszą obserwację i ocenę wpływu mechanizmów i elementów funkcjonalnych badanej architektury.

5. Czy Autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonywującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Redakcja pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Pewne uwagi można sformułować odnośnie sposobu prezentacji kilku fragmentów pracy. Szkoda, że autor poprzestał jedynie na dość ogólnej - opisowej - prezentacji celów pracy. Dobrą praktyka jest też prezentowanie - po zdefiniowaniu tezy pracy (mającej w opinii recenzenta zbyt rozmytą postać) zadań badawczych - celów pośrednich - niezbędnych do wykazania tezy. Stanowią one zwykle listę wspomagających zadań badawczych.

Zwyczajowo też praca powinna być uzupełniona nieco dłuższym niż 1-stronicowe, streszczeniem w języku polskim.

W kilku miejscach rozprawy zdecydowanie brakuje przekonywujących argumentów i komentarzy tłumaczących charakter prezentowanych wyników.

Praca składa się z czterech głównych części podzielonych dalej w sposób trójpoziomowy na podrozdziały. W odniesieniu do struktury pracy, uzyskany czteropoziomowy układ wydaje się zbyt szczegółowy jak dla pracy o objętości 140-150 stron.
W ocenie recenzenta zdecydowanie lepsze byłoby zredukowanie liczby poziomów pracy do trzech. Obecne rozdziały 1-12 są jednocześnie zbyt krótkie, tym samym korzystniejsze byłoby ich ograniczenie, np. poprzez połączenie w jeden rozdział:

- rozdziałów 5 i 6;
- rozdziałów 7 i 8, czy też
- rozdziałów 10 i 11.

Poza tym, nieodpowiednie jest wyodrębnienie w rozdziale 12 wyłącznie jednego podrozdziału (12.1).

Praca jest napisana w języku angielskim (ze streszczeniem polskim, zdecydowanie zbyt krótkim jak na wymagania - przynajmniej zwyczajowe - stawiane rozprawom doktorskim). Stylistyka pracy, jak i użyte słownictwo jest poprawne, z nielicznymi uwagami dotyczącymi:

- potocznego użycia słowa „kombinacja" w streszczeniu w języku polskim,
- zastosowań przedimków „a"/"the" – np.:
  - we frazie „...delivered by a data centers..." na stronie 7 „a" powinno być usunięte,
  - we frazie „on complete knowledge" na stronie 25 brakuje „a" przed „complete",
- nieprawidłowego dzielenia wyrazów z myślnikiem na końcu linii np. „dynamically-scalable" na stronie 12,

- formatowania symboli – np. symbol „p" na str. 34 powinien być sformatowany kursywą,
- symbol "s" ma co najmniej dwa znaczenia,
- w kilku miejscach pracy wyraźnie brakuje pełniejszych definicji pojęć, przy ich pierwszym użyciu - dotyczy to przykładowo określeń: „Brown KiloWatts" czy „network/cloud orchestration",
- w wykazie skrótów (Abbreviations) słowo „protocol" jest pisane z wielkiej litery, zarówno jako element nazwy własnej (np. PCEP), jak i nie będący składnikiem tejże nazwy (np. OVSDB). Zasadne byłoby w drugim przypadku stosowanie zapisu z małej litery,
- odwołania do literatury w rozdziałach pracy są ogólnie poprawne. Jednakże w przypadku odwołań wielokrotnych, zdarza się, że kolejność pozycji jest niewłaściwa – np. „[77], [28] or [97]" na stronie 16, czy „[67], [66] and [25]" na stronie 29,
- również forma wspomnianych odwołań wielokrotnych nie jest jednolita. Ogólnie w pracy każde odwołanie do pozycji literatury jest opatrywane własnymi nawiasami kwadratowymi, co jednakże jest zaburzone w kilku przypadkach (jak np. w dolnej części strony 19, gdzie para nawiasów kwadratowych obejmuje szereg pozycji – np. „[37, 47]" czy „[45, 47]".

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Praca obok bardzo wielu niewątpliwie mocnych stron i zalet ma też pewną liczbę uchybień i niedociągnięć różnej natury. I tak:

- Teza pracy „It is possibile to reduce..." jest zbyt ogólna/mało precyzyjna, a więc trywialnie łatwa do osiągnięcia (przy poprawie rezultatów nawet jedynie o ε). Niepokój budzą też stwierdzenia autora o spełnieniu narzuconych wymagania i obniżeniu ilości emitowanego dwutlenku węgla bez istotnego pogorszenia wydajności sieci (ograniczając się wyłącznie do prawdopodobieństwa blokady). Użytkownika sieci interesuje przede wszystkim koszt i jakość otrzymywanych usług. Zatem konkluzja zawarta w ostatnim zdaniu, że wszystko odbywa się bez istotnego pogorszenia jakości, budzi niepokój!
  Czy, zakładając utrzymanie jakości usług jesteśmy dalej w stanie obniżyć zużycie energii? Byłoby to stwierdzenie ważniejsze i mocniejsze, niż enigmatyczne zapewnianie o mało istotnym pogorszeniu jakości.

- Przyjęte w pracy założenia dotyczące bezpośredniej komunikacji systemu zarzadzania chmurą (SZCH) z centralnym sterownikiem (CS) sieci optycznej rodzą szereg pytań praktycznych. W pracy nie został w pełni wyjaśniony sposób w jaki przydzielone ścieżki w sieci optycznej odpowiadają rzeczywistemu ruchowi pomiędzy klientem a elementami infrastruktury środowiska chmury. Jak realizowana jest komunikacja klienta z SZCH i jak w tej architekturze wykorzystywany jest protokół IP? Te pytania pozostają bez pełniejszej odpowiedzi. Zapewnienie łączności na poziomie ścieżek optycznych byłoby zasadne dla bardzo specyficznych scenariuszy np. analizy zagregowanego dużego ruchu sieciowego. W pozostałych przypadkach łączność w warstwie sieciowej będzie bardzo istotna. Zwłaszcza, że niezbędna jest komunikacja klienta z SZCH, obejmująca przesłanie zgłoszenia zapotrzebowania na konkretną usługę w środowisku chmury.

- Brakuje również bardziej szczegółowej analizy sposobu komunikacji zależnej od różnych usług oferowanych w chmurze. Dla różnych usług, schemat wymiany komunikatów pomiędzy SZCH oraz centrum danych (CD) będzie różny. W skrajnych przypadkach istotne będzie przesłanie danych wejściowych do odpowiedniego CD oraz odebranie danych wyjściowych po, często czasochłonnej, operacji ich generowania. Czy w takim przypadku rezerwacja ścieżki na poziomie sieci optycznej na cały czas trwania operacji w chmurze jest zasadna? Ponownie również w tym kontekście pojawia się pytanie o zapewnienie łączności w warstwie sieciowej.

- Założenie dotyczące braku możliwości konwersji długości fali (str. 15) jest nieadekwatne do aktualnych rozwiązań. Byłoby ono zasadne kilkanaście lat temu. Obecnie konwertery długości fal są rozwiązaniem powszechnym. Przyjęte założenie wydaje się też być znacznym ograniczeniem w kontekście możliwości wyznaczania tras (niewątpliwie rośnie prawdopodobieństwo blokady - przez co zdecydowanie zmienia się również charakter prezentowanych w pracy wyników - wskazujących na "jakość" świadczonych przez sieć usług), jak też możliwości zmiany tras już zestawionych ścieżek optycznych. Założenie to stoi niejako w sprzeczności z nowatorskim charakterem badań proponowanych w rozprawie. Jest to jednym słowem założenie zupełnie nie na czasie i jako takie wymaga głębszego wyjaśnienia. Rodzi się też pytanie o to, czy konwersja długości byłaby możliwa w odniesieniu do proponowanych modeli? Brak konwersji oznacza bowiem cofnięcie się w analizie sieci optycznych o kilkanaście lat wstecz!

- Nie jest jasne czy prawdopodobieństwo blokady, w przypadku nieograniczonych zasobów centrów danych, związane jest wyłącznie z brakiem możliwości zestawienia ścieżki optycznej na skutek całkowitej zajętości łącza, ew. braku możliwości zestawienia kolejnego etapu (tutaj warunek braku konwersji), czy też w grę wchodzą inne zasoby węzłów sieci (a raczej ich brak). W kontekście prawdopodobieństwa blokady założenie o braku konwersji długości fali stanowić może istotną przyczynę odrzucania zgłoszeń. Szkoda, że w przypadku scenariuszy, w których autor wprowadził ograniczenia na zasoby centrów nie rozróżniono przyczyn blokady - brak zasobów DC ew. brak możliwości zestawienia ścieżki optycznej. Autor ograniczył się jedynie do określenia całkowitego prawdopodobieństwa blokady uwzględniającego ruch tła (zgłoszenia jednoadresowe - unicast) oraz żądania usług w chmurze (anycast). Niewątpliwie prawdopodobieństwa blokady na skutek braku zasobów jest kluczowe - jako parametr jakości świadczonych usług. Tym niemniej zastanawiający jest brak innych istotnych parametrów - np. średniej długości tras (liczby etapów transmisji) i/lub komentarzy na temat podstawowych parametrów QoS.

- W kilku fragmentach pracy brakuje pełniejszej analizy źródeł. Rozdział 1 sytuujący badania jest bardzo ubogi w takie odwołania (brakuje większej liczby odwołań do literatury, pozwalających na umiejscowienie/zestawienie osiągnięć pracy w relacji do rozwiązań alternatywnych, a pojedyncze odwołania w żadnej mierze nie wypełniają tej luki).

- Z kolei w rozdziale 5 brakuje szerszego porównania proponowanych strategii z podobnymi strategiami anycast znanymi z literatury (np. z pracy K. Walkowiaka, J. Raka: Shared backup path protection for anycast and unicast flows using the node-link notation. IEEE ICC 2011).

- Trudno jest przyjąć model overlay wymiany informacji między systemem zarzadzania chmurą a CS za referencyjny – z minimalną ilością informacji wymienianej miedzy systemami zarządzania chmurą i centralnym sterownikiem sieci SDN. Nie przystaje on bowiem ani do modelu pracy sieci SDN (z założenia, w tej architekturze, to raczej warstwa aplikacji ma dostarczać kontrolerowi informacje potrzebne do sterowania siecią, a nie kontroler sterować usługami w warstwie aplikacji) ani tym bardziej do sposobu zarządzania chmurą – z niezależnymi operatorami. Brak preferencji odnośnie wskazania zasobów w chmurze sprawia, że kontrolę (bardzo wątpliwą) nad chmurą oddajemy operatorowi sieci optycznej (brak w tym założeniu racjonalnych przesłanek). Budzi to naturalne obawy. W tym kontekście zdecydowanie brakuje krytycznej analizy „praktycznego zastosowania" zaproponowanego scenariusza. Czy rozwiązaniem bliższym rzeczywistości nie byłoby bezpośrednie połączenie CD dzierżawionymi łączami światłowodowymi (bez "pustych" węzłów sieci optycznej") albo wykorzystanie sieci typu overlay do połączenia odpowiednich CD?

- Kilka uwag, o różnym charakterze, można sformułować odnośnie założeń przyjętych dla badań symulacyjnych. Nie kwestionując zasadności przyjęcia czasu trwania przedziału warm-up nieco zastanawiające jest po części arbitralne zaproponowanie takich wartości, bez eleganckiego śledzenia parametrów i adaptacyjnego dopasowania tego przedziału do wymagań samego procesu. Ponadto w odniesieniu do szeregu wykresów zabrakło zupełnie komentarzy na temat np. wartości przedziałów ufności - dlaczego np. na Rys. 6.20 wartości te są praktycznie niezmienne, podczas gdy, dla przykładu, na Rys. 8.15 bardzo silnie zależą od "proporcji typów usług". Przyjęcie na większości wykresów "całkowitego" prawdopodobieństwa blokady, bez wnikania w przyczynę takich blokad zubaża rozprawę.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Rozprawa ma charakter zarówno teoretyczny jak i doświadczalny. Opracowane i zweryfikowane przez doktoranta algorytmy mogą być (potencjalnie) użyte do projektowania struktur sieciowych wykorzystujących architekturę chmury z centrami danych połączonych sieciami optycznymi (chociaż przy dość poważnych założeniach i ograniczeniach). Można więc mówić o istotnym, chociaż raczej potencjalnym, znaczeniu wyników rozprawy dla nauk technicznych.

8. Do której z następujących kategorii recenzent zalicza rozprawę? .
   a. niespełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy,
   b. wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania,
   c. spełniająca wymagania,
   d. spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem,
   e. wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie.

Biorąc pod uwagę zarówno niewątpliwe zalety pracy jak też jej pewne mankamenty zaliczam opiniowaną rozprawę do kategorii: *spełniająca wymagania z* ***wyraźnym nadmiarem*** *(przy czym jej zakres oraz kilka pozycji z dorobku autora, w tym ostatnio przyjęta do druku pozycja z listy JCR, istotnie podnosi wartość rozprawy zbliżając ją do kolejnej kategorii).* Zatem wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.