

Dr hab. inż. Krzysztof WALKOWIAK, prof. nadzw. PWr  
Wydział Elektroniki  
Politechnika Wrocławska

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra BORYŁO**  
**„Provisioning of Energy-Aware Cloud Services Over Optical Networks”**  
**Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Jajszczyk**

**1. Cel, zakres i charakter rozprawy**

Recenzowana praca dotyczy zagadnień związanych z sieciami teleinformatycznymi w kontekście usług przetwarzania w chmurze oraz efektywności energetycznej. Przetwarzanie w chmurze jest obecnie jedną z głównych koncepcji realizacji usług informatycznych dla klientów instytucjonalnych oraz indywidualnych. Jednocześnie należy podkreślić, że przetwarzanie w chmurze jest realizowane przez specjalizowane centra danych, która są znaczącym konsumentem energii elektrycznej w sektorze ICT. W związku z rosnącą potrzebą redukcji ilości dwutlenku węgla emitowanego w gospodarce, w tym w sektorze ICT, istnieje duża konieczność opracowania rozwiązań umożliwiających realizację usług informatycznych w modelu chmurowym z uwzględnieniem wymagań efektywności energetycznej i dbałości o środowisko naturalne. Główny cel rozprawy polega na zaproponowaniu nowych metod optymalizacji zasobów sieciowych umożliwiających redukcję ilości dwutlenku węgla emitowanego przez centra danych tworzące chmurę obliczeniową połączoną siecią optyczną uwzględniając pochodzenie wykorzystywanej energii. Tematykę rozprawy oceniam jako bardzo aktualną i ważną dla sektora ICT.

Rozprawa ma charakter zarówno poznawczy jak i użytkowy. W zakresie rozważań teoretycznych, mgr inż. Piotr Boryło opracował nowe algorytmy przydziału zasobów sieciowych pod kątem redukcji ilości dwutlenku węgla emitowanego przez centra danych tworzące chmurę obliczeniową oraz przedstawił schematy dopasowywania strategii przydziału zasobów sieciowych do typów usług oferowanych w chmurze. Zaproponowane algorytmy są wzbogacone przykładami numerycznymi, które pokazują ich najważniejsze właściwości. Natomiast aspekt użytkowy rozprawy jest związany z opracowaniem modeli współpracy pomiędzy operatorem sieci a dostawcą usług w chmurze, a także z implementacją zaproponowanych algorytmów w środowisku symulacyjnym oraz przeprowadzeniem wszechstronnych badań eksperymentalnych pokazujących najważniejsze właściwości zaproponowanych schematów oraz modeli współpracy.

## 2. Zawartości rozprawy

Rozprawa składa się z 5 części zawierających w sumie 12 rozdziałów. Pierwszy rozdział to wprowadzenie opisujące motywację tematu rozprawy oraz tezę doktoratu. Rozdział 2 zawiera opis podstawowych zagadnień związanych z tematyką przetwarzania w chmurze oraz efektywności energetycznej w sektorze ICT. W rozdziale 3 Doktorant przedstawił przegląd literaturowy dotyczący zagadnień poruszanych w rozprawie. Rozdział 4 opisuje środowisko symulacyjne wykorzystane do przeprowadzenia badań. W rozdziałach 5 i 6 mgr inż. Piotr Boryło definiuje i analizuje dynamiczne algorytmy przydziału zasobów sieciowych dla obsługi żądań typu anycast. Następnie, w rozdziałach 7 i 8 zaproponowane oraz zbadane są schematy dopasowywania strategii przydziału zasobów sieciowych do typów usług oferowanych w chmurze. W kolejnej części obejmujące rozdziały 9-11 poruszane są zagadnienia związane z modelami współpracy pomiędzy operatorem sieci a dostawcą usług w chmurze. Doktorant wprowadza nowe schematy i porównuje ich działanie. W końcu rozdział 12 zawiera podsumowanie pracy. W mojej ocenie struktura pracy jest prawidłowa. Doktorant w logiczny i klarowny sposób przedstawił kolejne zagadnienia, co znacznie ułatwia lekturę i analizę zawartości doktoratu. Ponadto, pragnę podkreślić wysoką jakość pracy pod kątem językowym, stylistycznym i edycyjnym.

## 3. Poprawności i oryginalności postawionej tezy

Teza pracy jest sformułowana w następujący sposób: *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.* W mojej opinii teza pracy jest sformułowana poprawnie. Mgr inż. Piotr Boryło na podstawie przeglądu literaturowego i własnej wiedzy prawidłowo określił zakres swojej pracy, koncentrując się na istotnych aspektach związanych ze współczesnymi sieci teleinformatycznymi.

Teza jest wykazana w rozprawie poprzez:

- Zaproponowanie szeregu dynamicznych algorytmów przydziału zasobów sieciowych dla obsługi żądań typu anycast.
- Zaproponowanie schematów dopasowywania strategii przydziału zasobów sieciowych do typów usług oferowanych w chmurze.
- Implementację algorytmów w środowisku symulacyjnym.
- Przeprowadzenie obszernych eksperymentów symulacyjnych i analizę uzyskanych wyników.

Moim zdaniem mgr inż. Piotr Boryło rozwiązał postawiony problem naukowy stosując prawidłowe metody badawcze. Postawione cele zostały w pracy osiągnięte. Dla wykazania tezy pracy Doktorant posłużył się eksperymentami symulacyjnymi, w których zaimplementował zaproponowane metody i następnie dla poprawnie stworzonych scenariuszy badawczych przeprowadził szereg badań symulacyjnych. Wyniki zawarte w pracy są opatrzone dokładną analizą i dyskusją.

## 4. Analiza źródeł (w tym literatury światowej i stanu techniki) świadczącej o dostatecznej wiedzy autora w danej dyscyplinie naukowej

Rozprawa doktorska mgra inż. Piotra Boryło dotyczy aktualnych obecnie zagadnień związanych z usługami chmurowymi oraz efektywnością energetyczną dostarczania usług informatycznych.

Doktorant przeprowadził dokładny przegląd bibliograficzny, lista literatury umieszczona w rozprawie zawiera 116 pozycji. Wśród nich znajdują się najważniejsze prace związane z tematyką dynamicznych algorytmów wyznaczania przepływów w sieciach optycznych, dostarczeniem usług chmurowych oraz efektywnością energetyczną w sektorze ICT. Stanowi to dobre wprowadzenie do prezentacji oryginalnych koncepcji Doktoranta oraz ułatwia lekturę pracy. Mogę jednoznacznie stwierdzić, że Doktorant posiada dostateczną wiedzę i znajomość współczesnej literatury z zakresu różnorodnych aspektów związanych sieciami teleinformatycznymi i systemami chmurowymi.

## **5. Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową**

Tematyka rozprawy jest związana z aktualnie rozwijanymi kierunkami badań w zakresie sieci teleinformatycznych. Zagadnienia dotyczące efektywności energetycznej oraz zmniejszania negatywnego wpływu na środowisko naturalne w sektorze ICT są obecnie bardzo istotnym tematem uwzględniając z jednej strony nieustanny wzrost zużycia energii przez sektor ICT, a z drugiej strony rosnącą świadomość negatywnego wpływu na środowisko emisji dwutlenku węgla.

W pracy poruszane są zagadnienia z wielu obszarów telekomunikacji i informatyki, w tym dotyczących sieci optycznych oraz systemów przetwarzania w chmurze. Praca zawiera zarówno aspekty teoretyczne związane z opracowaniem algorytmów dynamicznego przydziału zasobów w sieciach, jak i aspekty praktyczne związane z implementacją tych algorytmów w systemie symulacyjnym, opracowaniem scenariuszy badań uwzględniających aktualnie stosowane technologie i rozwiązania oraz przeprowadzeniem szerokich eksperymentów obliczeniowych.

Jedynym poważniejszym mankamentem w pozycji rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i stanu techniki reprezentowanych przez literaturę światową jest brak dokładniejszego odniesienia się w rozprawie do koncepcji elastycznych sieci optycznych (ang. *Elastic Optical Network*). Koncepcja elastycznych sieci optycznych – zyskująca w ostatnich latach bardzo dużą popularność – jest jednym z najbardziej prawdopodobnych scenariuszy dla rozwoju sieci optycznych stosowanych jako sieci szkieletowe umożliwiające dostęp do centrów danych zapewniających usługi chmurowe.

## **6. Znaczenie uzyskanych wyników dla danej dyscypliny naukowej**

Jako najważniejsze oryginalne osiągnięcia rozprawy doktorskiej mgra inż. Piotra Boryła należy wymienić:

- Sformułowanie problemu dynamicznego wyznaczania tras w sieciach optycznych WDM dla przepływów anycast (*jeden do jednego z wielu*) połączonego z problemem przydziału zasobów chmury obliczeniowej z uwzględnieniem źródła pochodzenia energii elektrycznej.
- Opracowanie trzy algorytmów dynamicznego wyznaczania przepływów typu unicast w sieciach optycznych: *randomGreen*, *closestGreen* i *closestGreenWithPenalty*.
- Opracowanie schematów dopasowywania strategii przydziału zasobów sieciowych tras do typów usług oferowanych w chmurze.
- Opisanie i przeanalizowanie różnych modeli współpracy pomiędzy operatorem sieci a dostawcą usług w chmurze.
- Implementacja opracowanych algorytmów i schematów w systemie symulacyjnym OMNeT++.

- Opracowanie różnorodnych scenariuszy badań z uwzględnieniem szeregu aspektów wynikających z aktualnie stosowanych rozwiązań w systemach chmurowych.
- Dokładna analiza uzyskanych wyników pod kątem efektywności poszczególnych metod i strategii, ich wpływu na efektywność energetyczną i możliwość redukcji ilości dwutlenku węgla emitowanego przez centra danych tworzące chmurę obliczeniową.
- Opisanie i przeanalizowanie architektury systemów chmurowych, w której zasoby obliczeniowe oraz zasoby sieciowe są zarządzane przez osobne organizacje.
- Przedstawienie i analiza danych dotyczących poboru energii przez centra danych oraz ich udziału w światowej emisji dwutlenku węgla.

Należy podkreślić, że opracowane koncepcje oraz uzyskane wyniki mają duże znaczenia praktyczne. Doktorant zdefiniował i następnie rozwiązał realny i aktualny problem badawczy związany ze świadczeniem usług w chmurze za pośrednictwem sieci optycznych.

Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że oprócz szerokiej analizy aspektów związanych z efektywnością energetyczną oraz zmniejszaniem negatywnego wpływu na środowisko naturalne, mgr inż. Piotr Boryło zaproponował i przeanalizował model współpracy między operatorem sieciowym oraz dostawcą usług chmurowych uwzględniając najnowsze trendy w tym obszarze, w tym sieci sterowane programowo SDN (ang. *Software Defined Network*).

## 7. Główne wady rozprawy, słabe stron wraz z krytycznymi uwagami szczegółowymi

### Uwagi natury ogólnej:

- Brak dokładniejszego odniesienia się w rozprawie do koncepcji elastycznych sieci optycznych (ang. *Elastic Optical Network*). Doktorant koncentruje się na aktualnie stosowanej technologii WDM. Jednak ponieważ elastyczne sieci optyczne są dynamicznie rozwijaną koncepcją, Doktorant powinien umieścić informacje jak rozwiązania zaproponowane w rozprawie można dostosować do optymalizacji elastycznych sieci optycznych.

### Uwagi polemiczne:

- Doktorant założył – na podstawie poprzednich prac realizowanych w zespole (pozycja [98] w liście literatury) – że liczba ścieżek kandydujących wynosi 3 dla każdej pary węzłów. Moim zdaniem ta decyzja powinna być poparta przeprowadzeniem badań, gdyż praca [98] dotyczyła wyłącznie przepływów typu unicast, a recenzowana rozprawa koncentruje się na przepływach typu anycast. Ponadto, w recenzowanej rozprawie jedna z rozważanych topologii (ItalyNet) nie była analizowana w pracy [98].
- W informacji zawartych w pracy wynika, że rozważane żądania (ang. *request*) są jednokierunkowe. Jednak nie jest jasne jak żądania typu anycast obsługiwane są przez centra danych. Jest to istotne zagadnienie w kontekście faktu, że wiele usług dostarczanych przez centra danych w systemach chmurowych ma charakter asymetryczny. Co więcej, asymetria ruchu może mieć różną charakterystykę. Na przykład systemy dystrybucji treści CDN (ang. *Content Delivery Network*) generują duży ruch w kierunku od centrum danych do użytkownika, z relatywnie małym ruchem w przeciwnym kierunku. Z kolei, systemy zdalnego składowania danych zapasowych albo systemy analizy obrazów mogą mieć charakter asymetryczny w odwrotnym kierunku, czyli użytkownik wysyła duża danych do centrów

danych. W rozprawie nie jest jasne czy żądania anycast analizowane w pracy generują ruch w obu kierunkach czy tylko w jednym kierunku i jaki jest to kierunek.

- Doktorant arbitralnie założył liczbę centrów danych w poszczególnych sieciach (5 dla sieci NSF i 6 dla sieci ItalyNet) w oparciu o wcześniejsze prace dotyczące podobnych problemów. Moim zdaniem w pracy brakuje dokładniejszego uzasadnienia tej decyzji. Interesujące byłoby zobaczyć wyniki uwzględniające również inną liczbę centrów danych, gdyż w zależności od liczby centrów danych zmienia się średnia odległość od najbliższego centrum danych, co może mieć duży wpływ na działanie dynamicznych algorytmów przydziałów zasobów.
- Podobnie, lokalizacja centrów danych nie jest szerzej zbadana, Doktorant jedynie wykorzystał lokalizacje centrów danych analizowane w innych pracach.
- W badaniach rozważono różne lokalizacje zielonych (ekologicznych) centrów danych. Jednak moim zdaniem – znając lokalizację poszczególnych węzłów w każdej z sieci – można było sprawdzić gdzie w danym kraju znajdują się zielone źródła energii (elektrownie wodne, wiatrowe, słoneczne, itd.) i wykorzystać tą wiedzę do opracowania scenariuszy lokalizacji zielonych centrów danych.
- Zbadane zostały dwie topologie sieciowe, są to reprezentatywne sieci stosowane w innych pracach jednak o dość podobnej wielkości w sensie liczby węzłów i charakterystyce topologicznej w postaci średniej incydencji węzła. Jednak, posiadając już gotowe narzędzia symulacyjne, Doktorant nie pokusił się o przeanalizowanie innych sieci o różnych parametrach w sensie gęstości sieci wyrażonej jako średnia incydencji węzła oraz wielkości sieci. Zbadanie większej liczby topologii podniosłoby znaczenie uzyskanych wyników i być może umożliwiłoby wyciągnięcie bardziej ogólnych wniosków.
- Jako technologia optyczna jest stosowany WDM z przepustowością 10 Gb/s dla jednej ścieżki optycznej (ang. *lightpath*). Z informacji przedstawionych w pracy wynika, że żądanie jest wyrażane zawsze jako pojedyncza ścieżka optyczna. Jednak w rzeczywistych systemach żądania związane są z konkretnymi usługami IT, które generują określony ruch sieciowy wyrażony w Gb/s. Czy rozważana była sytuacja, że dane żądanie wymaga ruchu innego (większego) niż pojemność jednej ścieżki optycznej 10 Gb/s i jak była rozwiązywana taka sytuacja, np. czy była zestawiana odpowiednio większa liczba ścieżek optycznych albo czy była możliwość obsługi takiego żądania przez różne centra danych?
- Czy jest możliwa sytuacja, że żądanie jest odrzucane nie z powodu braku zasobów sieciowych (widma optycznego), ale z powodu ograniczonych zasobów w centrum obliczeniowym?

#### Uwagi szczegółowe:

- Śledzenie wyników prezentowanych na wykresach byłoby moim zdaniem łatwiejsze gdyby obok siebie były prezentowane wykresy dotyczące skojarzonych wyników, np. wykres 6.7 powinien być pokazany razem z wykresem 6.10.
- Na części wykresów poszczególne serie danych dają bardzo podobne wyniki. W związku z tym śledzenie wyników poszczególnych serii danych jest dość utrudnione, gdyż symbole oznaczające poszczególne serie nachodzą na siebie. Być może bardziej czytelne byłoby pokazanie wyników w postaci wykresu słupkowego.

## **8. Konkluzja**

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie jednoznacznie sformułowanego zagadnienia naukowego. Mgr inż. Piotr Boryło wykazał w tej rozprawie w przekonujący sposób umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a także ich prawidłowej i wnikliwej interpretacji. Wymienione powyżej uwagi ogólne, polemiczne oraz szczegółowe nie mają znaczącego wpływu na ogólną pozytywną ocenę pracy. W związku z powyższym uważam, iż przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Boryła spełnia wymogi zawarte w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku (Dz. U. z 2003 r., nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.