dr hab. Stanisław Ambroszkiewicz
prof. nadzw. IPI PAN

Warszawa, 16 maja 2022

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Macieja Gawła pt. : *„Inteligentne zarządzanie usługami sieciowymi w wielo-wdrożeniowych środowiskach chmur obliczeniowych"*

wykonana dla Rady Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja, Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie

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)?

Tematyka rozprawy dotyczy, jak sam tytuł wskazuje, inteligentnego zarządzania usługami sieciowymi działającymi w środowiskach wielu chmur obliczeniowych, inaczej w rozproszonej chmurze. W szczególności, problem jaki postawił Doktorant do rozwiązania (przede wszystkim praktycznego) to dynamiczna realokacja usług podczas ich wykonywania w celu poprawy jakości obsługi (QoE).

Około 10 lat temu rozpoczęto wirtualizacje funkcji (usług) sieciowych (Network functions virtualization (NFV)). Z grubsza polega to na tym, że zwirtualizowane funkcje sieciowe - Virtualized network functions (VNFs) to softwarowe implementacje funkcji sieciowych, realizowane na routerach, przełącznikach, firewall-ach, czy systemach równoważenia obciążenia, które tradycyjnie były realizowane na własnościowym sprzęcie (hardware) z dedykowanym oprogramowaniem dla tego sprzętu. Można je wdrożyć w postaci infrastruktury NFVI - network functions virtualization infrastructure. Jest to zazwyczaj rozproszony system (sieć) komponentów sprzętowych i programowych. System taki potrzebuje zarządzania i orkiestracji; ze względu na złożoność i skalę powinno to być automatyczne i autonomiczne działanie wbudowane w tę infrastrukturę.

Historycznie ważny jest też framework do zarządzania i orkiestracji NFVI (NFV-MANO Architectural Framework) opracowany przez grupę roboczą o tej samej nazwie w ramach the European Telecommunications Standards Institute (ETSI). Jest w miarę dokładnie opisany i wykorzystany w rozprawie.

Od 2018 r. zaczęto przenosić wiele VNF do architektury opartej na mikroserwisach w kontenerach w chmurach obliczeniowych. Takie VNF, znane również jako Cloud-Native Network Functions (CNF), wykorzystują zalety chmury, jak np.: automatyczne skalowanie, model ciągłego dostarczania / wdrażania DevOps, oraz wzrost wydajności dzięki

udostępnianiu wspólnych usług na różnych platformach. Repozytoria usług i orkiestracja usług powoduje, że NFVI oparta na CNF może być bardziej odporna na awarie.

NFV oraz Software-defined networking (SDN) maja wiele wspólnego. SDN-y zmieniły sposób funkcjonowania globalnej sieci, tak że niewiele przypomina to oryginalny Internet mimo, że nadal używane są protokoły TCP,UDP/ IP, ale teraz głównie jako API.

Podsumowując te krótkie wprowadzenie do tematyki rozprawy, Doktorant podjął badania w bardzo ważnej, jeśli nie najważniejszej obecnie problematyce we współczesnych technologiach informacyjnych i telekomunikacyjnych (ICT). Z oczywistych względów skupił się na konkretnym problemie i jego rozwiązaniu przedstawionym w rozprawie, chociaż mam nieodparte wrażenie, że nie „zdradził" szczegółów technicznych swojego rozwiązania w kontekście infrastruktury 5G rozwijanej w Samsung-u gdzie pracuje.

Abstrahując od infrastruktury sieciowej (w tym również 5G), tematyka Rozprawy sprowadza się do automatycznej orkiestracji i zarządzania CNApp (Cloud-Native Application) w środowisku rozproszonej chmury podczas jej działania. To wymusza automatyczną i autonomiczną rekonfiguracje CNApp w czasie jej działania. Mechanizmy do takiej rekonfiguracji powinny być wbudowane (albo przynajmniej umożliwione) podczas jej implementacji. Uniwersalne mechanizmy (na poziomie projektowania architektury) dla takich rekonfiguracji są kluczowe w rozwoju zaawansowanych systemów informacyjnych w chmurach obliczeniowych. Wynika to ze skali współczesnych CNApps zwłaszcza w BigTech-ach, gdzie taka skala sięga tysięcy a nawet dziesiątek tysięcy mikroserwisów składających się na złożoną pojedynczą CNApp. W tym kontekście ciekawe jest, jaka jest skala w dla infrastruktury 5G np. w Samsung-u?

Problem naukowy jakiego się podjal Doktorant, na wysokim poziomie abstrakcji, sprowadza się do dynamicznej (w czasie wykonania) relokacji mikroserwisów (składających się na CNApp dla zwirtualizowanej hierarchicznej infrastruktury 5G) w ramach rozproszonej chmury należącej do operatora 5G. Ta relokacja jest powodowana potrzebą ciągłego dostosowywania aplikacji do stanu środowiska wykonawczego (zasobów obliczeniowych i sieciowych), w tym również aktualnego zapotrzebowania na usługi (ilość, jakość oraz rodzaje) świadczone przez tę aplikację. Zasadnicze pytanie jest czy ta adaptacja nie powinna dotyczyć również struktury samej aplikacji, tj. rekonfiguracji grafu aplikacji (modulo replikacje) również poprzez usuwanie pewnych mikroserwisów i /lub wprowadzanie nowych.

Rozprawa ma charakter bardziej praktyczny niż teoretyczny. Autor zaprojektował i zrealizował Autonomiczny System Zarządzania – AMS (Autonomic Mamagement System) do relokacji mikroserwisów, i przeprowadził szereg weryfikacji na stosunkowo niedużych grafach aplikacji (mikroserwisów) oraz grafach DCs (klastrów).

Infrastruktura telekomunikacyjna (NFVI oparta na CNF) dla systemów 5G obsługuje wielu użytkowników końcowych zlokalizowanych w różnych regionach. Jeden DC nie wystarczy, ponieważ wprowadziłby pojedynczy punkt awarii. Co więcej, niektóre usługi wrażliwe na opóźnienia muszą być wdrażane w pobliżu użytkownika końcowego. Dlatego infrastruktura dla 5G składa się z wielu DCs.

Klaster K8s jest traktowany jako baza do zarządzania aplikacjami w chmurze. Wiele klastrów K8s wdrożonych w wielu DCs tworzy multiklasterowe środowisko.

Teza rozprawy jest następująca:
Istotnym i niezbędnym mechanizmem inteligentnego zarządzania systemem wieloklastrowym jest umożliwienie dynamicznej migracji usług w czasie wykonywania.

Sama teza abstrahuje od CNF jako implementacji NS w kontekście infrastruktury telekomunikacyjnej 5G.

2. 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 przekonywający?

Analiza stanu wiedzy i zastosowań została przeprowadzona wystarczająco w Rozdziałach 2, 3, 4 i 5. Zawiera przegląd podstawowych pojęć i wyników dotyczących zakresu Rozprawy.

Rozdział 2 przedstawia architekturę systemów 5G z perspektywy NS.
Ten rozdział i następny dotyczy wyzwania jakim jest wdrażanie NS w środowiskach chmur obliczeniowych. W szczególności, ponieważ NS są reprezentowany przez grafy mikroserwisów uruchamianych w wielu kontenerach, istnieje potrzeba zapewnienia aranżacji mikroserwisów w tych kontenerach.

W Rozdziale 3 opisana została infrastruktura telekomunikacyjna 5G na poziomie abstrakcji odpowiadającym DCs, czyli rozproszonej chmury w postaci wielu połączonych hierarchicznie Centrów Przetwarzania Danych. Następnie przedstawiona została jedna z najpopularniejszych platform orkiestracyjnych Kubernetes1 (K8s), oraz autonomiczne właściwości udostępniane przez tę platformę.
Na koniec wprowadzono i omówiono tzw. Service Mesh, który można następnie wykorzystać do zapewnienia ogólnej infrastruktury wieloklastrowej, a zamierzeniu Autora zapewnie dla 5G.

W Rozdziale 4: *Intelligent management and orchestration of Network Services*, Autor przedstawia IBM Autonomic Computing, NFV-MANO Architectural Framework, oraz model referencyjny MAPE-K

W Rozdziale 5 *Study of a software stack for multi-cluster Environments*, przedstawione zostały aktualne badania przemysłowe dotyczące autonomicznego systemu zarządzania w środowisku wielo-klastrowym. Przyjęto, że stan środowiska można reprezentować w dwóch grafach, tj. grafie klastrów (DCs) i grafach aplikacji. Rozdział ten zawiera ocenę istniejących rozwiązań w zakresie wieloklastrowej łączności sieciowej, obserwowalności oraz zarządzania i orkiestracji. Daje to, zdaniem Autora, dobrą podstawę do formalnej specyfikacji (w następnym Rozdziale) problemu postawionego do rozwiązania w Rozprawie.

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

Zasadnicze rezultaty Autora zostały opisane w Rozdziale 6: *Design of Autonomic Management System for intelligent placement adaptation.*

Głównym celem Autora jest projekt i implementacja Autonomic Management System (AMS).

Dla zadanych: grafu aplikacji (CNApp) oraz grafu DCs (rozproszonej chmury), problem polega na dynamicznej relokacji (podczas wykonania CNApp) mikroserwisów (składających się na CNApp) w środowiskach wieloklastrowych w celu optymalizacji jakości działania przy zachowaniu ograniczeń narzuconych przez środowisko uruchomieniowe, takich jak zasoby klastrów i przepustowość łączy pomiędzy nimi.

Graf DCs (klastrów) jest, w założeniu Autora, w większości statyczny i dobrze zdefiniowany, ponieważ same klastry i ich zasoby nie są często zmieniane, z wyjątkiem metryk opisujących wykorzystane zasoby, opóźnienia, itp.
Natomiast graf aplikacji jest znacznie bardziej dynamiczny, ponieważ mikroserwisy można łatwo wdrożyć lub skalować. Metryki opisujące mikroserwisy i połączenia również zmieniają się w czasie.

Problem polega na znalezieniu najlepszego rozmieszczenia mikroserwisów (z grafu aplikacji) w węzłach (klastrach) grafu DCs w zadanym czasie, które minimalizuje funkcję celu, a którą można zdefiniować jako łączne opóźnienie dla wszystkich połączeń pomiędzy mikroserwisami (tak zostało to przyjęte przez Autora), ale również może to być, np. równoważenie obciążenia i użytych zasobów na klastrach.

Parametry opisujące klastry i ich połączenia, oraz grafy aplikacji zmieniają się w czasie.

Migracja (relokacja) mikroserwisu pomiędzy klastrami jest (może być) technicznie złożonym procesem, jeśli mikroserwis zachowuje stan, czy też posiada gniazda serwerowe. Te problemy są w miarę dokładnie omówione w Rozprawie, ale nie na poziomie ich technicznych rozwiązań.

Autor zakłada bezstanowość migrowanych usług, ale to nie wystarcza, potrzebna jest rekonfiguracja połączeń sieciowych gniazdo_klienta -> gniazdo-serwera. W konstruktorze gniazda_klienta musi być zmieniony adres IP hosta gdzie jest gniazdo_serwera. Może to być zrobione poprzez DNS (używając nazw zamiast adresów IP w konstruktorze), ale wymaga to resetowania tego gniazda. Czy można (i jak w kodzie) to zrobić bez resetowania mikroserwisu?
Doktorant utrzymuje, że system Cilium to umożliwia, jako gotowe open-source-owe narzędzie. Dla dociekliwego czytelnika może to być niewystarczające. Tym bardziej, że przekierowywanie połączeń do przeniesionych mikroserwisów (na innych adresach IP) wymaga technik stosowanych w SDN.
Połączenia TCP nie mogą być kontynuowane w relokowanych mikroserwisach ze względu na stan połączenia TCP (chociażby ze względu na numery sekwencyjne i numery potwierdzeń). Dla połączeń UDP tak nie jest, są bezstanowe; ale aplikacje korzystające z takiego połączenia mogą utrzymywać stan; dobrze jak jest on w osobnej usłudze BaaS.

Autor analizuje również koszt migracji, który jest trudno z góry oszacować, a na który składa się: czas niezbędny, przestoje i zamknięcie niektórych zależnych mikroserwisów, zerwane sesje komunikacyjne itd., itp.
Autor konkluduje, że najlepsza relokacja to taka, która wymaga możliwie najmniejszej ilości migracji.

Planer jest istotmym komponentem AMS dla rozmieszczenia mikrousług (z grafu aplikacji) na klastrach (grafie DCs).
Sam problem jest NP-trudny. Do tego może dochodzić skala, tj. tysiące mikroserwisów i setki klastrów, w niedalekiej przyszłości być może o rząd wielkości więcej.

Zasadnicza funkcjonalność AMS sprowadza się do autonomicznej i automatycznej konfiguracji, optymalizacji i przywrócenie normalnego funkcjonowania systemu po awarii (recovery from failures). Konfiguracja dotyczy początkowego rozmieszczenia mikroserwisów na klastrach, i ewentualnej relokacji ze względu na:
1. Awaria węzła roboczego.
2. Awaria klastra.
3. Zwiększone opóźnienie dostępu do klastra.
4. Nie spełnianie funkcji celu.
5. Zmiany obciążenia aplikacji.

Ta konfiguracja nie dotyczy zmian w strukturze grafu aplikacji CNApp. Autor wspomina, że zmiany mogą wystąpić ale są one przekazywane do AMS jako parametr z zewnątrz, tj, nie są one w zakresie autonomicznych funkcji systemu AMS. Jest to znaczne uproszczenie, ponieważ rekonfiguracja CNApp jest (nie licząc replikacji mikroserwisów bezstanowych) jedną z kluczowych cech jej architektury.

Ewaluacja AMS oraz jego eksperymentalna weryfikacja jest w Rozdziale 7: *System evaluation,* i zawiera 39 stron!

Skala jest niewielka; graf (pełny, czyli połączanie każdy z każdym) klastrów ma 11 wierzchołków. W infrastrukturze 5G graf DCs uwzględnia hierarchię tej infrastruktury; tutaj takiej hierarchii nie ma.

Autor wykorzystał open-source component Isotope (Istio topology performance) do konstrukcji prostych CNApp dla zadanych 3 grafów aplikacji (składających się z 60, 98 i 121 mikroserwisów), z których najciekawszy i złożony (pod względem komunikacji pomiędzy wierzchołkami) jest na 98 wierzchołkach i ma 185 krawędzi. Czy strzałki wyznaczają kierunek przepływu wiadomości (danych)? Są to statyczne acykliczne grafy z pojedynczym korzeniem. Może lepiej byłoby rozpatrywać grafy przepływu danych z warunkowymi rozgałęzieniami i dynamicznymi rozwinięciami pętli? Same grafy aplikacji zawierają niewiele informacji o funkcjonalmości aplikacji.

W AMS używany jest algorytm First Fit z Depth First Search do wyznaczania (optymalnego?) rozmieszczenia węzłów grafu alikacji w grafie klastrów.
Dobrze by było porównać te rozmieszczenie wyliczone dla tych przykładów z optymalnymi.

Wyniki eksperymentów z AMS dla niepowodzeń, awarii pojedynczych węzłów, całych klastrów, i ogólnie działań związanych z autonomicznym zarządzaniem CNApp w rozproszonej chmurze, nie napawają optymizmem. Czasy potrzebne do naprawy systemu i jego działania są rzędu kilkunastu a nawet kilkudziesięciu minut (!) dla tak małej skali grafów aplikacji i grafów DCs.
Wydaje się, że zasadniczym powodem tak długich czasów jest zastosowanie przez Doktoranta tzw. standardowych modeli, platform, frameworków i narzędzi, takich jak K8Ss, NFV-MANO, MAPE-K, Cilium, Istio, itd. Same w sobie są one bardzo złożone (poprzez swoją założoną uniwersalność), i chociaż w sumie dają one założoną przez Doktoranta funkcjonalność, to równocześnie propagują swoją złożoność na AMS, a w sumie powodują jeszcze większą złożoność systemu AMS.

Nie deprecjonuje to pionierskiej pracy Doktoranta, a raczej wskazuje na ogromną złożoność problemu i konieczność zastosowania zupełnie nowych abstrakcji do ogarnięcia takich złożonych systemów.

Jest to niewątpliwie dobry początek badań i poszukiwania nowych metod dla rozwoju CNApps w środowisku rozproszonej chmury.

A jeśli dodać faktyczne dymamiczne (podczas wykonania) rekonfiguracje grafu aplikacji, to problem staje się (przy dużej skali) potwornie trudny od zrozumienia a cóż dopiero do dobrego i akceptowalnego (niekoniecznie optymalnego) rozwiązania.

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?

Tematyka, którą podjął Doktorant jest niezmiernie ważna i aktualna w ICT.
Sam konkretny problem do rozwiązania (również praktycznego) to dynamiczna realokacja mikroserwisów podczas ich wykonywania w celu poprawy jakości obsługi (QoE).
Rezultatem jest AMS - autonomiczny system dla zarządzania CNApp w rozproszonym środowisku wielochmurowych poprzez dynamiczna relokację mikroserwisów składających się na CNApp podczas ich wykonywania. Jest to jest bardzo trudny problem. Samo rozwiązanie, w postaci projektu i realizacji AMS, należy uznać za nowatorskie.

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

Miejscami tekst jest rozwlekły i jest wiele powtórzeń. Zawsze może by lepiej.
Należy wziąć pod uwagę, że to co dla mnie (jako recenzenta) może się wydawać „rozwlekłe" dla innych może być istotne i konieczne żeby zrozumieć istotę problemów poruszanych w Rozprawie.

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

Większość najważniejszych uwag jest już w punkcie 3 tej recenzji.

W Rozdziale 2, abstrakcyjna reprezentacja 5G Core składa się z 3 warstw: User plane, Control plane oraz Data layer jako zaplecze dla danych (bazy danych i macierze dyskowe). Te ostatnie ma umożliwiać bezstanowość dla NF. Jest to ważna cecha w kontekście mikroserwisów dla CNApp, ale nie jest to jasne dla NFs realizowanych na sprzęcie (hardware).
Jak te warstwy mają się do SDN?
Czy 5G Core to SDN?
Wydaje się, że przy wirtualizacji 5G i realizacji Control plane w chmurach, te pytania są na miejscu. Wobec tego, Doktorant powinien się odnieść do tego w Rozprawie, a szczególnie do Remote Controller i OpenFlow w kontekście infrastruktury 5G.

Spodziewałem się, że w Rozdziale 7, przykłady do ewaluacji będą nawiązywać do infrastruktury 5G. Niewątpliwie, byłoby to bardziej pracochłonne. Po co więc Rozdział 3 o 5G opartej na wirtualizacji funkcji sieciowych (każda z nich realizowana jako kompozycja mikro-serwisów)? Owszem, ten rozdział jest ciekawy, ale powinno być chociaż odniesienie systemu AMS do 5G.

Po przeczytaniu Rozprawy można mieć niedosyt. Ale należy wziąć pod uwagę to, że są to dopiero rozwijające się najnowsze technologie. Czas (wkrótce) pokaże jak zmienią one ICT i nie tylko. Czy czeka nas nowa przełomowa (re)ewolucja w ICT?

Samsung Networks szeroko wykorzystuje zarówno platformę K8s, jak i MANO, aby zapewnić do realizacji infrastruktury wielo-chmurowej 5G. Dla Autora (jako pracownika Samsung-a) ważne jest, aby na nich oprzeć proponowane rozwiązanie. W tytule rozdziału jest "usługi sieciowe" czy to maja być CNFs (cloud-native network functions)? Ale dalej nie ma nic o 5G ani też o VNFs, a tym bardziej o CNFs.

Autor nie cytuje pracy:

Autonomic management framework for cloud-native applications / Joanna KOSIŃSKA, Krzysztof ZIELIŃSKI // Journal of Grid Computing ; ISSN 1570-7873. — 2020 vol. 18 iss. 4, s. 779–796. — Bibliogr. s. 794–796, Abstr.. — Publikacja dostępna online od: 2020-09-26. — tekst: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10723-020-09532-0.pdf

na zasadzie cudze chwalicie swego nie znacie - jest to już chyba tradycja w KI AGH.

Na ile proponowany przez Doktoranta AMS jest podobny do AMoCNA, który jest również oparty na idei Autonomic Computing i na modelu referencyjnym MAPE-K?

Jedna z najważniejszych cech AC to *„Self-configuration: Automatic configuration of components"*.
Skoro główny problem w Rozprawie został sprowadzony do CNApps i relokacji mikroserwisów w rozproszonej chmurze, to pozostaje pytanie po co MANO?

Jest tutaj niekonsekwencja wynikająca chyba z oddzielenia treści Rozprawy od rzeczywistych rozwiązań realizowanych w Samsung-u przez Doktoranta.

7. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych?

Autonomiczne zarządzanie aplikacją typu cloud-native w chmurze obliczeniowej jest obecnie kluczowym problemem w IT; tym bardziej w rozproszonej chmurze obliczeniowej. Koncepcja i implementacja AMS jest interesująca pod względem technologii informacyjnych i komunikacyjnych (ICT) i stanowi oryginalny wkład Doktoranta.

Przydatność wyników Autora opisanych w Rozprawie jest potencjalnie bardzo duża, chociaż należy uwzględnić prototypowy charakter AMS.

Należy jeszcze raz podkreślić ambitną próbę Doktoranta zmierzenia się z bardzo trudnym naukowym i technologicznym wyzwaniem. Wyniki opisane w rozprawie nalezy uznać za wystarczające i technologicznie ciekawe; stanowią one dobre rozwiązanie problemu postawionego w Tezie rozprawy.

W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Gawła <u>spełnia w pełni</u> wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą Ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (Dz.U. Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami).

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:
a) nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy
b) wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania
c) spełniająca wymagania
d) <u>spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem</u>
e) wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Sławomir Ambroziewicz