

dr hab. inż. Sławomir Hausman, prof. uczelni

Instytut Elektroniki
Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki
Politechnika Łódzka
Al. Politechniki 10
93-590 Łódź

Recenzja rozprawy doktorskiej

Autor rozprawy: **mgr inż. Łukasz Kułacz**

Tytuł: **Utilization of Context Information for Spectral-Efficiency Enhancement in Future Radio Communication Systems**

Promotorzy: **dr hab. inż. Adrian Kliks, prof. uczelni**

Praca wykonana na **Wydziale Informatyki i Telekomunikacji Politechniki Poznańskiej**

PODSTAWA OPRACOWANIA

Poniższa recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Poznańskiej prof. dra hab. inż. Andrzeja Jaskiewicza, datowane na 6 czerwca 2022 r.

TEMATYKA, CEL BADAŃ, TEZY

Od czasu uruchomienia analogowych sieci komórkowych na początku lat osiemdziesiątych XX w., byliśmy świadkami kilku rewolucji w łączności bezprzewodowej. Od 1G do 4G wzrost pojemności (wyrażony w Erlangach/km² dla usług głosowych, a dla transmisji danych w (b/s)/km²) był uzyskiwany głównie przez wykorzystywanie nowych i szerszych pasm częstotliwości, nowych metod modulacji, kodowania i wielodostępu oraz zagęszczania sieci stacji bazowych. Nawet po wprowadzeniu rewolucyjnych w dzisiejszym rozumieniu rozwiązań w 5G postęp się nie zatrzymuje. Ma to związek z przewidywanym wzrostem zapotrzebowania na usługi transmisji danych i QoS/QoE w miarę rosnących potrzeb w zakresie Internetu Rzeczy, pojazdów autonomicznych, wirtualnej rzeczywistości, telemedycyny (w tym zdalnej diagnostyki obrazowej). Różne zaawansowane techniki, takie jak nowe metody modulacji i wielodostępu, komunikacja wieloantenowa (ang. massive Multiple Input Multiple Output – mMIMO), czy agregacja nośnych, zostały już wykorzystane w istniejących generacjach sieci komórkowych. W systemach 6G przewidziane jest wykorzystanie bardzo szerokich pasm częstotliwości w zakresie fal milimetrowych i subterahercowych, choć trzeba pamiętać, że mają one niekorzystne własności propagacyjne w środowiskach wysoko zurbanizowanych – nawet w połączeniu z inteligentnymi powierzchniami odbijającymi. Dlatego poszukiwane są nowe rozwiązania umożliwiające poprawę efektywności spektralnej, także w pasmach poniżej 6 GHz (tzw. pasmach zasięgowych). Badania prowadzone przez mgra inż. Łukasza Kułacza dotyczą właśnie tej ważnej i aktualnej tematyki. Warto w tym miejscu zaznaczyć, że prowadzenie badań w tym zakresie wymaga rozległej i wielokierunkowej wiedzy, ponieważ obecne systemy bezprzewodowe są skomplikowane

i wykorzystują jednocześnie bardzo różnych technik w różnych warstwach, począwszy od warstwy fizycznej. Nawet jeśli ograniczymy się do ich analizy tylko w jednym wybranym przekroju, np. wydajności widmowej (jak to zrobił Autor), to musimy uwzględnić wiele aspektów – ograniczenia fizyczne, architektura, algorytmy, standardy, uwarunkowania prawne, trendy rozwojowe, nowe usługi, itd.

Autor sformułował następującą tezę:

„With the use of contextual information, it is possible to design a spectrum management algorithm, as a result of which the spectral efficiency of the system is increased.”

Ponieważ recenzja jest opracowana w języku polskim, a teza jest istotnym elementem pracy, to pozwolę sobie przetłumaczyć ją na język polski jako: "Dzięki wykorzystaniu informacji kontekstowych możliwe jest opracowanie algorytmu zarządzania widmem, który zwiększy efektywność spektralną systemu." Według mnie teza jest poprawnie sformułowana, choć dość ogólna. Doprecyzowują ją cel i zakres pracy opisane we wstępie. W tym miejscu warto zaznaczyć, że liczba pojedyncza słowa „algorytm” w tezie może być myląca, bo Autor opracował i przetestował wiele różnych algorytmów.

Autor prowadził swoją pracę przy użyciu metod teoretycznych, symulacji komputerowych oraz badań empirycznych. Opiniowana praca ma więc charakter teoretyczno-doświadczalny.

Tematyka pracy jest bardzo aktualna ze względu na rozwój systemów 5G, a jeszcze bardziej w związku z toczącymi się pracami badawczymi w zakresie 6G, gdzie informacje kontekstowe będą niezbędne do prawidłowej pracy sieci. Bez baz danych typu Radio Service Map, zwłaszcza w zastosowaniu do predykcji zdarzeń, zarządzanie zasobami systemu i łączami mogłoby okazać się niemożliwe, choćby ze względu na własności propagacyjne fal milimetrowych (np. przewidywanego 110–170 GHz) i subterahercowych. Kanały radiowe na tych częstotliwościach, przy ruchu użytkowników w środowiskach wysoko zurbanizowanych pojawiają się i zanikają gwałtownie, gdy na drodze propagacji pojawia się jakakolwiek przeszkoda. Przewiduje się zastosowanie anten mMIMO o jeszcze większej niż obecnie liczbie jednoczesnych wąskich wiązek, które będą nie tylko przełączane, ale będą też mogły płynnie podążać za poruszającymi się terminalami. Ponadto, w takich scenariuszach prawdopodobnie konieczne będzie zastosowanie inteligentnych powierzchni odbijających. Biorąc pod uwagę dużą szybkość z jaką system będzie musiał (predykcyjnie) zarządzać tymi elementami i zasobami widmowymi, rozbudowane informacje kontekstowe będą niezbędne. Także w obecnych sieciach 2G/3G/4G (zwłaszcza w przypadku częstego przenoszenia obsługi użytkownika między różnymi generacjami sieci) informacje kontekstowe i uczenie maszynowe mają zastosowanie do detekcji przyczyn i przewidywania i zapobiegania zdarzeniom takim jak tzw. silent calls (brak głosu w zestawionym połączeniu), samoistne zakończenie połączeń i wiele innych oraz słaba jakość usług transmisji danych. W tym kontekście chcę podkreślić bardzo duże znaczenie poznawcze i potencjał aplikacyjny badań prowadzonych przez Doktoranta oraz osoby, z którymi wspólnie prowadził badania.

OMÓWIENIE STRONY FORMALNEJ ROZPRAWY

Rozprawa, wraz z bibliografią ma objętość 184 stron. Spis treści, spis rysunków, tabel, akronimów oraz symboli ponumerowano odrębnie. Układ rozprawy uważam za dostosowany do tematyki i zakresu badań opisywanych przez Autora. Omówienie układu rozprawy ograniczę do stwierdzenia, że jest ona podzielona na siedem rozdziałów, włączając w to wstęp i podsumowanie. Rozprawę napisano w języku angielskim, którym Autor posługuje się bardzo sprawnie. Klarowność i poprawność językowa

powodują, że rozprawę czyta się łatwo, choć długo, bo praca jest obszerna i zawiera bardzo dużo informacji. Bibliografia zawiera 246 pozycji (artykuły i książki naukowe, witryny internetowe, w tym 34 pozycje autorstwa Doktoranta (także odrębnie zebrane w Dodatku A).

OCENA NAUKOWEJ WARTOŚCI ROZPRAWY

Przystępując do oceny wartości naukowej dysertacji, na początku chcę podkreślić bardzo dobre rozeznanie Autora w aktualnym stanie wiedzy. Bibliografia jest bardzo bogata, zawiera 246 pozycji (artykuły i książki naukowe, witryny internetowe, materiały firmowe, raporty organizacji i agend rządowych), w tym 34 pozycje współautorstwa Doktoranta. Autor uwzględnił także najnowsze prace w tym z lat 2021 i 2022 – opublikowane tuż przed złożeniem dysertacji. Źródła są, moim zdaniem, właściwie dobrane i powoływane w dysertacji we właściwym kontekście. Dysertacja jest obszerna i zawiera dużo materiału w postaci wyników symulacji, wyników pomiarów i ich analiz. Na uznanie zasługuje opanowanie przez Autora zarówno podstaw teoretycznych, metod symulacji komputerowej, jak i techniki badań empirycznych (sprzęt, oprogramowanie i obróbka wyników pomiarów).

Praca składa się z kilku części, poświęconych wydzielonym zagadnieniom badawczym, którymi są: teoretyczne podejście do wykorzystania informacji kontekstowej w systemach dynamicznego dostępu do spektrum częstotliwości (ang. Dynamic Spectrum Access – DSA), implementacja własnego algorytmu DSA i jego weryfikacja eksperymentalna, wykorzystanie informacji kontekstowej w ultra gęstych sieciach bezprzewodowych i w końcu własna metoda zarządzania widmem (wirtualizacja widma) i jej implementacja software'owa, pozwalająca m.in. na realizację koncepcji freemium.

Do oryginalnych wyników pracy zaliczam:

1. Wykorzystanie tzw. krigingu (metoda estymacji) do interpolacji map typu REM (ang. Radio Environment Map) tworzonych na podstawie pomiarów. Sama idea nie jest nowa, ale klasyczny kriging został zmodyfikowany, tak aby poprawić jakość interpolacji, tam gdzie są zlokalizowane budynki, z uwzględnieniem wzajemnej orientacji ścian i kierunku do stacji bazowej.
2. Wykazanie – zarówno przy wykorzystaniu symulacji komputerowych jak i w warunkach laboratoryjnych (terminale zrealizowane z wykorzystaniem USRP – tzw. radia programowalnego) – że w ramach pewnego ustalonego pasma częstotliwości, dzięki dynamicznemu przydzielaniu zasobów widmowych DSA (ang. Dynamic Spectrum Access), możliwe jest zwiększenie liczby użytkowników, co prowadzi do zwiększenia całkowitej przepływności systemu, a tym samym do poprawy efektywności widmowej.
3. Opracowanie algorytmu przydziału częstotliwości i sterowania mocą w komórkach (stacjach bazowych), z kryterium maksymalizacji średniej gęstości mocy. W wyniku takiego działania możliwa jest maksymalizacja (lub przynajmniej zwiększenie, bo nie ma możliwości zagwarantowania osiągnięcia maksimum globalnego) średniej przepływności na danym obszarze.
4. Opracowanie algorytmu wyboru kształtu sygnału (ang. waveform), który pozwala na dobór odpowiedniej modulacji dla poszczególnych użytkowników, co z kolei umożliwi zwiększenie liczby użytkowników korzystających z danej części pasma (możliwość zmniejszenia pasm ochronnych pomiędzy użytkownikami). Wzięto pod uwagę następujące klasy modulacji Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM), Filter Bank MultiCarrier (FBMC), Non-Contiguous Orthogonal Frequency-Division Multiplexing, Non-Contiguous Filter Bank MultiCarrier (NC-FBMC).
5. Opracowanie i eksperymentalna weryfikacja systemu dostępu do widma. Dzięki obserwacji jakości usług dla użytkowników pierwotnych w czasie rzeczywistym, opracowane podejście może

umożliwić dostęp do widma dla nowego nielicencjonowanego użytkownika przy zachowaniu ochrony przed zakłóceniami dla użytkownika licencjonowanego. Godne podkreślenia jest przeprowadzenie testów opracowanej metody w warunkach terenowych z wykorzystaniem aparatury laboratoryjnej.

6. Zastosowanie metody SPS (ang. Semi-Persistent Scheduling) alokacji bloków zasobów radiowych, co pozwala na zmniejszenie liczby decyzji i w konsekwencji zmniejszenie ilości danych sterujących przesyłanych przez sieć. Po zastosowaniu tej metody nie zaobserwowano spadku przepływności dla użytkowników – rozwiązanie jest neutralne dla użytkowników i korzystne z punktu widzenia efektywności widmowej i energetycznej sieci.
7. Opracowanie oryginalnej modyfikacji metody przypisania urządzeń użytkownika do komórek, która pozwala na poprawę przepustowości / wydajności widmowej poprzez zmianę wartości parametru CRE (ang. Cell Range Extension(Expansion?)). Działanie tej metody zweryfikowano na drodze symulacji komputerowych dla systemu LTE(-A), pokazując że użytkownicy uzyskują większe przepływności, kosztem pewnego zwiększenia częstości niezbędnych powtórnych wyborów komórek (ang. cell reselection).
8. Opracowanie systemu/sposobu zarządzania ultra gęstymi sieciami, który jest inspirowany działaniem komórek ludzkiego mózgu. Interesującym i oryginalnym podejściem jest wzorowanie się na funkcjach zarówno komórek neuronalnych (transmisja danych), jak i nieneuronalnych (zarządzanie działaniem węzłów sieci). Autor proponuje wykorzystanie tego podejścia na przykład do zarządzania siecią w sytuacjach awaryjnych/kryzysowych w celu uzyskania większej niezawodności i dostępności sieci i ewentualnie zwiększonej efektywności widmowej. Ciekawym pomysłem jest wzorowanie się na działaniu komórek mikroglejowych i astrocytów (aktywowanych oddzielnie lub łącznie). Rozwiązanie obecnie jest na etapie wstępnej oceny pomysłu, ale już zostało częściowo zweryfikowane w symulacjach komputerowych z pewnymi ograniczeniami (brak mobilności węzłów). W ramach prac dotyczących inspiracji działaniem mózgu Doktorant opisał interesujące rozwiązanie transmisji (w ultra gęstych sieciach), które poprawia niezawodność sieci, dzięki obserwacji zachowania się sąsiednich węzłów i dodatkowo informacji spoza sieci. Przedstawiono różne implikacje uproszczenia algorytmów przetwarzania danych, które może zapewnić np. dłuższe życie sieciom sensorów ograniczonych energetycznie. Nie jest to wprawdzie konkluzja nieoczekiwana, bo kierowano się nią np. projektując standardy transmisji dla usług typu LPWA (ang. Low Power Wide Area), takie jak NB-IoT, ale Autor przedstawił m.in. oryginalne podejście do symulacji dla własnej metody komunikacji między węzłami.
9. Opracowanie algorytmu podejmowania decyzji (optymalizującej ofertę na widmo z uwzględnieniem kryteriów ekonomicznych) dla oprogramowania SMA (Spectrum Management Application). SMA jest narzędziem zarządzania i dynamicznego dostępu do widma w heterogenicznych radiowych sieciach dostępowych. W założeniach to narzędzie ma służyć do wdrażania różnych polityk i reguł zdefiniowanych np. przez regulatorów telekomunikacyjnych i operatorów. Oprogramowanie ma między innymi ułatwić implementację koncepcji freemium w dostępie do widma. Zaproponowano pewne przypadki użycia opracowanej metody np. komórki fantomowe (ang. phantom cells) – rozdzielanie warstwy sterowania i warstwy usług transmisyjnych) oraz zmiany wielkości komórki (ang. cell zooming). Przypadki te wstępnie zbadano symulacyjnie.
10. Analiza możliwości wykorzystania w kontrolerze RIC (ang. Radio Access Network Intelligent Controller) programów (aplikacji) typu xApp do optymalizacji zarządzania zasobami widmowymi, zwłaszcza w pewnych szczególnych scenariuszach świadczenia usług. Zasyulowano kilka takich scenariuszy. Zbadano skuteczność wykorzystania metod uczenia maszynowego (w badanym

przypadku regresji logistycznej) do automatycznego wyboru wariantu sterowania opartego na regułach (ang. policy-based control).

Podsumowując ocenę naukowej wartości rozprawy, uważam, że Doktorant bardzo dobrze poznał i opisał aktualny stan wiedzy, właściwie wskazał i umotywowował kierunki swoich badań oraz zastosował właściwe metody badawcze teoretyczne i empiryczne. Moim zdaniem opisane wyniki badań są oryginalne w skali światowej. Od recenzenta oczekuje się jeszcze oceny samodzielności pracy. Pisząc o uzyskanych wynikach p. Kułacz używa liczby mnogiej „we”, co utrudnia wydzielenie jego indywidualnego, samodzielnego dorobku. Rozumiem, że badania z racji ich złożoności i koniecznego nakładu pracy były prowadzone w dość dużym zespole/zespołach. W tej sytuacji cenną wskazówką dla recenzenta jest wykaz osiągnięć współautorskich przedstawiony przez Doktoranta w Dodatku A (str. 181–184), który określa swój wkład w każdą z publikacji. Odnoszę się jeszcze do tego wykazu osiągnięć w dalszej części recenzji. Uważam za warte podkreślenia, że ewidentnie Doktorant dobrze wykorzystał możliwość prowadzenia pracy w silnym zespole Instytutu Radiokomunikacji Politechniki Poznańskiej, który od dawna prowadzi badania w zakresie radia kognitywnego i wykorzystywania informacji kontekstowej, których liderami są prof. Hanna Bogucka i dr hab. Adrian Kliks, prof. uczelni (promotor rozprawy).

UWAGI KRYTYCZNE

Poniżej wymieniam kilka pytań, wątpliwości i dostrzeżonych przeze mnie błędów, które podaję w porządku numeracji stron:

1. Doktorant pisze (str. 1): „By spectral efficiency, one can mean the number of transmitted bits per unit time using a given bandwidth. Therefore, the goal is to maximize this value, transmitting as many bits as possible while maintaining the same bandwidth.”. Moim zdaniem, taki cel maksymalizacji wykorzystania dostępnego widma może być niekorzystny dla użytkowników, jeśli będzie widziany jedynie z perspektywy operatora. Może on bowiem oznaczać, że użytkownicy z gorszymi warunkami propagacyjnymi będą doświadczać niskiej jakości usług nie tylko z powodów obiektywnych (niska wartość SINAD), ale dodatkowo dlatego, że będą im celowo przydzielane mniejsze zasoby, bo nie przyczyniają się do maksymalizacji wydajności widmowej z punktu widzenia operatora.
2. „The most important is information about the average or median received power level in each measurement point.”. (str. 30). Mediana i średnia nie są tożsame. Jaki sens ma użycie spójnika lub (ang. „or”) w tym zdaniu.
3. Co znaczy „several to several centimeters” w zdaniu „During this time, the entire measuring system was shifted by several to several centimeters on each side to average the impact of the multipath effect and thus the fading selective.” (str. 30). Czy miało być „several to several dozen centimeters”?
4. Ponieważ Autor niemal wszędzie używa decybeli (co jest typowe i praktyczne w analizie warstwy fizycznej łączy radiowych), to również wzór (3.6) (str. 50) należałoby podać w wersji decybelowej, tym bardziej, że kilka wierszy powyżej wzoru pojawia się wartość mocy w dBm. Myślę, że Autor jest świadomy różnic między skalą liniową a logarytmiczną, bo np. powołując się na wzór (3.5) zaznaczył że jest on w skali liniowej. We wzorze (3.6) zabrakło definicji wielkości α , która

prawdopodobnie ma zastępować pierwszy czynnik – wyrażenie zawierające zyski anten i długość fali.

5. We wzorze (3.23) (str. 63) zabrakło zmiennych całkowania, chyba, że istnieje nieznaną konwencją zapisu uproszczonego, w której wystarczy zdefiniować zmienne granic całkowania, jak we wzorze (3.24).
6. We wzorze (5.3) (str. 125) zabrakło zysków anten. Jeśli z jakiegoś powodu założono zyski anten równe 1 (w stosunku do anteny izotropowej), to należało to jawnie zaznaczyć. Ponadto, dlaczego założono propagację w wolnej przestrzeni – wykładnik propagacji o wartości 2? Wzór byłoby łatwo adaptować to innych, bardziej realistycznych wartości tego wykładnika.
7. Prawdopodobnie w zdaniu „Similarly, in simple solutions, emergency network nodes require only a small amount of context information.” (str. 161) chodziło o „context” a nie „contest” information. Podobnie w zdaniu „Taking into account another trend in radio communication, which is virtualization, we present an approach to using context information for spectrum management in the form of a SMA.” (str. 126).
8. Na rysunku 6.9 (str. 137) uwzględniono anteny o zysku kierunkowym w stosunku do anteny izotropowej o wartościach od 60 do 90 dBi. Nie istnieją anteny stacji bazowych o tak dużych zyskach, a już z pewnością nie dla częstotliwości rzędu 2,6 GHz, którą podaje Doktorant. Być może anteny na pasma subterahercowe będą kiedyś mogły mieć zyski tego rzędu, choć i tak raczej nie 90 dBi.
9. „As an example, the process of both collecting and processing data regarding the signal in the TV band was presented.” (str. 159). Biorąc pod uwagę, że podsumowanie powinno być dość dobrze zrozumiałe bez studiowania całości dysertacji, to zdanie nie jest jasne.
10. Czasami Autor wybiera niezbyt stosowny styl podręcznika, a nie dysertacji doktorskiej, np. (str. 159): „Let us recall the research thesis put forward at the beginning...”.
11. Na str. 161 Autor pisze: „It is worth adding that the presented table contains only simplified information. For most types of contextual information, it is much more beneficial to collect data over time and analyze the history of changes in value data. As opposed to access only the instantaneous value of given contextual information, we can distinguish certain patterns that allow us to make even better decisions.” To ogólnie może być prawdą, ale zagadnienie jest trudne. Jakimi metodami (ML/AI, ukryte modele Markowa, sieci rekurencyjne, konwolucyjne, inne?) według Autora można wypracować lepsze decyzje na podstawie danych historycznych? Jak można zorganizować historyczne informacje kontekstowe, w tym różne zdarzenia asynchroniczne (dla których czas wystąpienia lub wzajemny odstęp mają znaczenie), aby dało się nimi uczyć sieci neuronowe?
12. „As opposed to access only the instantaneous value of given contextual information, we can distinguish certain patterns that allow us to make even better decisions.” (str. 161). To zdanie jest dla mnie niezrozumiałe.
13. „Then, in Sec. 3.2, the pre-verified theorem was subjected to another trial where the same system, as in Sec. 3.1, was tested with real hardware.” (str. 162). Czy „hardware” bywa „unreal”? Sądzę,

że słowo „real” powinno być zastąpione bardziej precyzyjnym i konkretnym określeniem zastosowanego sprzętu.

14. Jakie miary jakości Autor ma na myśli w zdaniu: „In Sec. 4.1, another system of access to the spectrum was designed, which, this time in field tests in the real network, confirmed the possibility of using the spectrum by unlicensed users without a noticeable decrease in the quality of licensed transmission.” (str. 162).
15. „In this case, the use of contextual information improves the throughput of all network users, with a low cost of more switches between cells.” (str. 162) Czy Autor miał na myśli „switches”, czy „handovers”?
16. „Then, in Chap. 6, the SMA concept is presented along with examples of its development, implementation, and even verification with the use of hardware.” (str. 163). Słowo „even” brzmi w tym kontekście nieco naiwnie, albowiem nie ma nic wyjątkowego w tym, że chcemy eksperymentalnie weryfikować nasze hipotezy. Sądzę, że Autor miał na myśli „... and empirical verification.”

Pomimo powyższych uwag, ogólny poziom merytoryczny dysertacji oceniam wysoko.

PODSUMOWANIE OCENY ROZPRAWY I WIEDZY DOKTORANTA

Opisane badania dotyczą bardzo aktualnego zagadnienia wykorzystania informacji kontekstowych do zwiększenia wydajności widmowej w systemach łączności bezprzewodowej. Praca niewątpliwie zawiera oryginalne wyniki, które rozszerzyły wiedzę w przedmiotowym zakresie. Najważniejsze z nich wymieniałem we wcześniejszej części recenzji. Pan mgr inż. Łukasz Kułacz omawia zagadnienia ujęte w pracy kompetentnie i z uwzględnieniem aktualnego stanu wiedzy.

Doktorant wyodrębnił swoje współautorskie publikacje w Dodatku A. Jest współautorem (w zespołach od 2 do 8 współautorów) piętnastu publikacji w czasopismach takich jak 2 × IEEE Vehicular Technology Magazine (140 pkt.), 2 × IEEE Access (100 pkt.), 5 × Sensors (100 pkt.), 3 × Journal of Telecommunications and Information Technology (40 pkt.), 1 × Wireless Communications and Mobile Computing (40 pkt.), 2 × Przegląd Telekomunikacyjny + Wiadomości Telekomunikacyjne (20 pkt.) oraz 19 komunikatów w materiałach recenzowanych konferencji międzynarodowych, z których jeden – *Cognitive Radio-Oriented Wireless Networks* był opublikowany w serii Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering wydawnictwa Springer. Zadaniem recenzenta jest dokonanie oceny, czy Kandydat posiadał umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co wymaga wyodrębnienia osiągnięć indywidualnych. Tutaj utrudnieniem jest to, że Doktorant w dysertacji zawsze używa liczby mnogiej „we”. Natomiast w w Dodatku A (Appendix A, str. 181–184) wykazał tylko swój wkład, np. „conceptualization, methodology, software, simulations, validation, writing original draft, visualization”, co przecież nie oznacza, że inni współautorzy nie mieli wkładu także w tych samych zakresach. Dlatego uważam, że dla rozwiania wszelkich wątpliwości, podczas publicznej obrony Doktorant powinien wypunktować te osiągnięcia, które uważa za samodzielne, albo takie, w których jego wkład był przeważający.

Podsumowując tę część recenzji, uważam że p. mgr inż. Łukasz Kułacz w swojej rozprawie opisał oryginalne i znaczące w skali światowej wyniki badań naukowych oraz wykazał się dużą wiedzą z zakresu dyscypliny *informatyka techniczna i telekomunikacja*, w której prowadzony jest przewód.

ZGODNOŚĆ Z WYMAGANIAMI USTAWOWYMI I KONKLUZJA

Po zapoznaniu się z przedłożoną mi do recenzji dysertacją mgr inż. Łukasza Kułacza pt. „Utilization of Context Information for Spectral-Efficiency Enhancement in Future Radio Communication Systems”, stwierdzam, że omówiony w niej dorobek naukowy spełnia wymagania art. 13 ust. 1 *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr 65 poz. 595, z późniejszymi zmianami), gdzie mowa o oryginalnym rozwiązaniu problemu naukowego oraz o ogólnej wiedzy teoretycznej kandydata w danej dyscyplinie naukowej – w rozpatrywanym przypadku dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. W związku z tym, wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Łukasza Kułacza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny dysertacji oraz dużą liczbę publikacji, których p. mgr inż. Łukasz Kułacz jest współautorem, w tym opublikowanych w wysoko punktowanych czasopismach, stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.

Łódź, 23 września 2022 r.



Sławomir Hausman