

Opinia nt. rozprawy doktorskiej mgra inż. Marcina Witkowskiego

pt.: **“Robust speaker verification with reverberation suppression and spoofing detection”**, wykonanej pod kierunkiem dra hab. Konrada Kowalczyka oraz dra inż. Jakuba Gałki (promotora pomocniczego).

1. Jakie zagadnienie naukowe/badawcze jest rozpatrywane w pracy (cel i teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie sformułowane przez autora

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Marcina Witkowskiego pt.: **“Robust speaker verification with reverberation suppression and spoofing detection”**. Zagadnienia badawcze rozprawy są ukierunkowane na skuteczność i bezpieczeństwo systemów weryfikacji mówcy, działających w różnych warunkach akustycznych. W szczególności dotyczy to zwiększenia odporności tego typu systemów na ataki i próby fałszowania przy jednoczesnym usuwaniu pogłosu z sygnału wejściowego.

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter teoretyczno-eksperymentalny, składa się z sześciu rozdziałów oraz obszernej Bibliografii (212 źródeł). Całość obejmuje 154 strony tekstu. Praca zawiera następujące elementy: streszczenia w j. angielskim i polskim, listę rysunków, tabel oraz wykaz ważniejszych skrótów, w tym odniesienie do symboli i oznaczeń matematycznych, wprowadzenie, podstawy systemów rozpoznawania mówcy i zagadnień związanych z usuwaniem pogłosu (dereverberacją), metodologie rozpoznawania/weryfikacji mówcy rejestrowanych jednokanałowo uwarunkowanych odległością mówca-mikrofon, metody związane z detekcją ataków na systemy weryfikacji mówcy z uwzględnieniem własnych propozycji oraz rozwiązania stanowiące rdzeń ocenianej rozprawy i które dotyczą optymalizacji metod usuwania pogłosu z sygnału i ich wpływu na jakość weryfikacji w warunkach wielokanałowych (mikrofony umieszczone w pomieszczeniu w sposób losowy).

Doktorant przedstawił dwa główne cele rozprawy. Pierwszym celem jest zbadanie różnych metod zwiększenia skuteczności weryfikacji mówcy w warunkach pogłosowych oraz zaproponowanie nowych podejść, które wspierają ten cel. Drugim celem jest zwiększenie bezpieczeństwa systemu weryfikacji poprzez zmniejszenie jego podatności na ataki typu *spoofing* – podszywania się i fałszowania sygnału

metodą powtórkową (*replay*), a w szczególności wykrywania prób ataków opartych na fałszowaniu sygnału wejściowego poprzez odtworzenie wcześniej nagranego sygnału (mowy), tj. wykorzystania techniki prezentacji.

Uwaga: ponieważ powyższe wyrażenia są najczęściej stosowane bez ich tłumaczenia na język polski, dlatego w swojej recenzji będę je w ten sposób przywoływać.

We Wprowadzeniu doktorant podaje w pierwszej kolejności genezę prac badawczych, na którą składają się dwa wątki – pierwszy dotyczący weryfikacji mówcy w warunkach pogłosowych i drugi, który wskazuje na problem detekcji ataków typu *replay spoofing* w takich uwarunkowaniach. W dalszej kolejności pojawiają się cele i tezy pracy, odniesienie do prac badawczych, w ramach których zostały przeprowadzone eksperymenty oraz motywacja tematyki badań, która wypłynęła częściowo z doświadczeń uzyskanych w ramach prowadzonych grantów.

W rozprawie zostały podane trzy hipotezy badawcze, których dowody na poprawność pojawiają się odpowiednio w rozdziałach 3, 4 i 5:

(w j. ang.):

- 1. Incorporating the feature set composed of reverberation robust features and features computed on dereverberated speech signal into a distant speaker verification system improves speaker verification performance compared to using only features of a single type, i.e. either only features with or without reverberation suppression.**
- 2. The countermeasure algorithms based on high-frequency features increase the accuracy of replay attack spoofing detection compared to full-band analysis.**
- 3. Sparse dereverberation applied as preprocessing to speaker verification in reverberant conditions improves its performance compared to using non-sparse dereverberation or no preprocessing front-end.**

(w j. polskim):

- 1. Włączenie wektora cech składającego się z parametrów odpornych na pogłos i obliczonych dla sygnału mowy poddanemu usuwaniu (*derewerberacji*) pogłosu do systemu weryfikacji mówcy na odległość poprawia skuteczność weryfikacji w porównaniu z wykorzystaniem cech tylko jednego typu, tj. albo parametrów z tłumieniem pogłosu w sygnale, albo bez usuniętego pogłosu.**
- 2. Algorytmy przeciwdziałania oparte na cechach ekstrahowanych z wyższych pasm sygnału zwiększają dokładność detekcji ataków typu *spoofing* – podszywania się i fałszowaniem metodą powtórkową (przechwytywania danych i ich retransmisji – *replay*) w porównaniu z analizą w pełnym paśmie.**
- 3. Wykorzystanie rzadkiej macierzy krótkookresowej transformacji Fouriera w procesie *derewerberacji* jako metody wstępnego przetwarzania**

do weryfikacji mowy w warunkach pogłosowych poprawia jej wydajność w porównaniu do metody, w której nie wykorzystuje się tej cechy dekompozycji sygnału bądź nie stosuje się przetwarzania wstępnego.

Kolejny podrozdział przedstawia **osiągnięcia doktoranta**, które zostały przywołane w dalszej części recenzji.

We Wprowadzeniu znajduje się również wykaz publikacji przygotowanych we współautorstwie z doktorantem (trzy artykuły z wykazu MEiN, siedem referatów konferencyjnych, w tym przedstawionych na najważniejszych forach międzynarodowych (INTERSPEECH, ICASSP, EUSIPCO). Warto też zauważyć, że doktorant brał udział w konkursie dotyczącym skuteczności przeciw atakom fałszowania w warunkach pogłosowych, tj. ASVspoof (oraz VOiCES oraz SdSV Challenges).

Wprowadzenie kończy opis zawartości i konstrukcji rozprawy. Rozdział 2. przedstawia stan wiedzy we wszystkich wątkach badawczych, ale też wprowadza podstawy proponowanej metodologii, odwołując się do aktualnych metod rozpoznawani mowy oraz kompensacji warunków pogłosowych. W rozdziale tym znajduje się odniesienie do przyjętej metodologii (symulacje z wykorzystaniem sztucznie wygenerowanych odpowiedzi impulsowych (ang. *Room Impulse Response*), symulacje z rzeczywistymi odpowiedziami impulsowymi oraz nagrania zawierające pogłos). W rozdziale znajduje się również opis wykorzystanych baz danych mowy. Rozdziały 3, 4 i 5 odnoszą się do właściwych badań i odpowiadają zadanym hipotezom, zaś rozdział 6. stanowi podsumowanie osiągniętych wyników. Rozdziały 3-5 w części wykorzystują wyniki opisane częściowo w publikacjach autora rozprawy.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł, w tym, literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle

Lista źródeł jest bardzo obszerna i zawiera 212 pozycji; została uszeregowana w kolejności alfabetycznej. Zawiera źródła pochodzące również z ostatnich lat, tj. 2019-2022, w tym kontekście zgromadzona literatura jest aktualna. Dla przykładu, pewien niedosyt budzi fakt cytowań źródeł pochodzących z poprzedniej/poprzednich dekad w aspekcie metody GMM-UBM (*Gaussian mixture universal background model*; metoda ulepszonych mikstur gaussowskich). Pomimo wady tej metody (tj. adaptacji nie tylko cech dyskryminujących mowy, ale również czynników związanych z kanałem transmisji i zakłóceń, co może stać się jej zaletą w zależności od wykorzystania), jest ona stosunkowo często wykorzystywana. Warto by doszukać bardziej aktualne doniesienia w tym temacie. Przegląd literatury w odniesieniu do obu wątków rozprawy (tj. usuwanie pogłosu/weryfikacja mowy i bezpieczeństwo systemów weryfikacji mowy) pojawia się w rozdziale 2. rozprawy. Zgromadzone źródła cytowane są też sukcesywnie w kontekście przedstawianych wątków badawczych w kolejnych rozdziałach (3-5).

W rozprawie doktorskiej nie pojawiają się wprost odniesienia do zastosowań praktycznych (i w przemyśle), oprócz własnych dokonań w ramach projektów badawczych realizowanych w latach 2012-2015 oraz 2013-2016. Jednak rozprawa ma wyraźnie charakter aplikacyjny, co jest istotne z punktu widzenia praktycznego wykorzystania uzyskanych wyników badań. W ogólności prowadzone eksperymenty są ukierunkowane na propozycje nowych metod/strategii, jak również optymalizację i zwiększenie skuteczności istniejących rozwiązań w odniesieniu do stanu wiedzy. Warto też zauważyć, że doktorant brał udział w zadaniach konkursowych (edycje światowe), a więc miał możliwość bezpośredniego sprawdzenia proponowanych rozwiązań w praktyce.

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

Należy zauważyć, że tematyka rozprawy zbudowana jest z kilka wątków badawczych powiązanych ze sobą. Każdy z rozdziałów przedstawiających wyniki badań zawiera podrozdziały dotyczące stanu wiedzy. Przyjęta metodologia – warunkowana hipotezami badawczymi wyraźnie przekracza osiągnięcia stanu wiedzy. Zwykle problematyczna jest ocena skuteczności proponowanych rozwiązań, bowiem miary standardowo stosowane w ocenie wyników systemów rozpoznawania mowy, weryfikacji mówcy, jakości sygnału mowy najczęściej nie sprawdzają się w bezpośrednim zastosowaniu, gdy np. występują trudne uwarunkowania akustyczne (pogłos, hałas, itd.). Należy bowiem zauważyć pewną sprzeczność założeń, systemy usuwania pogłosu (czy echa) ingerują zwykle mocno w przetwarzany sygnał, z kolei zabezpieczenia systemów weryfikacji mówcy mogą traktować tego typu ingerencję w sygnale wejściowym jako atak na system. Dlatego propozycje takich miar wprowadzone przez autora rozprawy należy ocenić bardzo pozytywnie. Z tego względu można przyjąć, że rozprawa ma charakter zarówno eksperymentalny, jak teoretyczny. Ponadto, ważnym elementem poszukiwań jest w przypadku omawianej rozprawy znalezienie cech sygnału odpornych na proces usuwania pogłosu. Ma to bezpośrednie przełożenie na kolejny wątek badawczy, czyli możliwość wykrywania ataków fałszowania (oszustwa) na system weryfikacji mówcy.

W ramach rozprawy wykorzystywana została szeroka gama zaawansowanych metod analizy sygnału mowy, jak również miar skuteczności/jakości proponowanych rozwiązań, adaptowanych na podstawie literatury lub proponowanych przez autora, odnoszących się do prezentowanych problemów. W zasadzie trudno jest wylistować wszystkie metody, gdyż pojawiają się w różnym kontekście, tj. ekstrakcja cech; miary oceny skuteczności dyskutowane i proponowane w zależności od rozpatrywanego problemu; metody modelowania mowy (pomimo iż nie jest to główny wątek badawczy pracy); różne bazy danych wykorzystane w uczeniu maszynowym; różne strategie/ustawienia mikrofonów w warunkach pogłosowych; różne wielkości pomieszczeń (symulowane i rzeczywiste). Ponadto przywoływane/proponowane

metody dotyczą wątków badawczych rozpatrywanych osobno oraz łącznie, np. ekstrakcja cech odpornych na usuwanie pogłosu-weryfikacja mówcy w warunkach ataku fałszowania.

W rozprawie wykorzystane zostały metody uczenia maszynowego, przy czym autor podkreśla, że koncentruje się głównie na metodach generatywnych ze względu na ewentualne zastosowania zaproponowanej metodologii na platformach mobilnych. Niemniej jednak w rozprawie przebadane również zostało podejście z użyciem sieci głębokich.

Warto również zwrócić uwagę, że Autor rozprawy zaproponował określone strategie, ich weryfikację poprzez szereg eksperymentów, które w efekcie pozwoliły następnie na ich optymalizację. Celem pierwszych dwóch eksperymentów przedstawionych w rozdziale 3. było zbadanie wydajności systemów weryfikacji mówcy wykorzystujących metody: GMM-UBM (Gaussian Mixture Model – Universal Background Model) oraz i-wektor (i-vector) przy zastosowaniu wybranych technik normalizacji w scenariuszu, w którym mikrofony są rozmieszczone w różnej konfiguracji w symulowanym pomieszczeniu. Przy takim układzie autor badał, w jaki sposób wybór mikrofonów podczas uczenia i testowania systemu weryfikacji mówcy wpływa na wyjściową wydajność systemu. Druga część eksperymentu (rozdział 3.5), poświęcona została wykorzystaniu głębokich struktur sieci neuronowych (DNN). Autor argumentuje i udowadnia, że algorytm ekstrakcji cech, który zapewnia najlepszą wydajność w przypadku generatywnego systemu i-wektorowego, odnosi również korzyści, gdy jest zastosowany w połączeniu z wytrenowanym systemem głębokim (x-vector). Metodologia tego eksperymentu – chociaż znana z literatury – została w tym przypadku wykorzystana do zbadania parametrów/cech mowy odpornych na pogłos, co stanowi nowatorskie podejście. Należy również zauważyć, że badany był kontekst jedno/wielokanałowy poprawy jakości mowy. Uzyskane wyniki udowadniają tezę nr 1.

Rozdział 4. obejmuje badanie użyteczności określonych zakresów częstotliwości sygnałów w celu wykrywania ataku replay oraz proponuje nowatorską metodę ekstrakcji cech opartą na liniowej predykcji (LP) sygnału resztkowego. Jeden z głównych wniosków tych badań dotyczy większej skuteczności cech ekstrahowanych w wysokich pasmach sygnału w wykrywaniu ataków fałszowania niż użycie cech obliczonych z pełnego spektrum sygnału. Wyniki uzyskane przez autora rozprawy, przewyższające znacząco rezultaty w odniesieniu do konkursu ASVspoof 2017, pozwalają na stwierdzenie poprawności tezy nr 2.

Niewątpliwie najbardziej istotny w kontekście osiągnięć autora rozprawy wydaje się rozdział 5, w którym zostały przeprowadzone wielowątkowe badania szczegółowe i ocena hiperparametrów metod derewerberacji (rzadkich/nierzadkich) i ich znaczenia dla różnych warunków akustycznych za pomocą analizy statystycznej. Jednym z głównych wyników było opracowanie nowej wielokanałowej metody

derewerberacji (Sparse Split Bregman; SSB), która zapewnia lepszą kontrolę rzadkości dekompozycji sygnału wyjściowego niż inne metody. W rozdziale tym została również przeprowadzona analiza korelacji miar wydajności derewerberacji z metrykami wyjściowymi systemów rozpoznawania mowy i mówcy. Uzyskane wyniki wskazują na wyższą skuteczność zaproponowanej metodologii zarówno w kontekście systemów weryfikacji mówców, jak i automatycznego rozpoznawania mowy. W ten sposób została udowodniona teza 3.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy i poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową

Wiadomo, że głos ludzki jest jednym (ważnym) elementem systemów biometrii. Dlatego ciągle trwają badania nad znalezieniem optymalnego wektora cech sygnału mowy wraz metodami modelowania głosu w celu zniwelowania wpływu zmiennych czynników – zarówno związanych bezpośrednio z mówcą, tj. stanem emocjonalnym, starzeniem się głosu, chorobami mającymi wpływ na głos, jak i wymowę oraz zewnętrznymi, jak np. zakłócenia czy pogłos. Dodatkowy aspekt, jakim jest odporność przed atakami fałszowania zwiększa jeszcze trudność takiego zadania. Warto zauważyć, że jednym z głównych produktów światowych korporacji (Google, Amazon, Apple, Microsoft) są skuteczne systemy rozpoznawania mowy. Jednak nie dotyczy to przypadku, gdy mówca znajduje się w trudnych warunkach akustycznych (w szczególności dotyczy to pogłosu). Ten sam problem dotyczy weryfikacji mówcy, szczególnie, gdy tego typu systemu są dodatkowo narażone na ataki fałszowania. Dlatego połączenie tych aspektów stanowi niewątpliwie oryginalne dokonanie autora rozprawy.

W tym miejscu warto przywołać oryginalne osiągnięcia uzyskane w ramach badań prowadzonych przez doktoranta. Dotyczą one:

- zaproponowania strategii treningu systemu i losowego przypisywania mówcy do mikrofonu dla systemów weryfikacji w przypadku wielu mikrofonów rozmieszczonych w sposób losowy w przestrzeni zamkniętej;

- przebadania algorytmów ekstrakcji cech odpornych na pogłos w kontekście trzech dominujących obecnie metod modelowania mówcy, które są typowo stosowane w obszarze weryfikacji mówcy;

- zaproponowania algorytmu ekstrakcji cech, który integruje parametry odporne na pogłos znane ze stanu wiedzy, z cechami mel-cepstralnymi (*Mel Frequency Cepstrum Coefficients*) wyekstrahowanymi z sygnału po derewerberacji;

- wyników badania przydatności segmentacji sygnału w pasmach w detekcji ataków fałszowania, że główne wskazówki dla tego zadania można znaleźć w paśmie wyższych częstotliwości; zaproponowane podejście opublikowane na konferencji

Interspeech znalazło potwierdzenie w licznych cytowaniach do tej pracy (136 cytowań w Google Scholar);

- wyników analizy użyteczności segmentacji sygnału w pasmach w detekcji ataków wykorzystującej cepstrum predykcji liniowej sygnału resztkowego;
- opracowania i oceny nowej, ogólnej, wielokanałowej metody opartej na predykcji liniowej z rzadką dekompozycją sygnału mowy poddanemu *derewerberacji*, dla której istniejące metody są jej szczególnymi przypadkami;
- przebadania nowatorskiego podejścia opartego na wykorzystaniu technik rzadkiej dekompozycji sygnału *derewerberacji* w kontekście weryfikacji mówcy i rozpoznawania mowy;
- wyników analizy zależności pomiędzy wyjściowymi miarami wydajności *derewerberacji*, weryfikacji mówcy oraz rozpoznawania mowy.

Wiele z podanych osiągnięć przekracza stan wiedzy. Jednak jedno z ważniejszych wydaje się zaproponowane podejście wykorzystywane do usuwania pogłosu, który wymusza rzadkość macierzy krótkookresowej transformacji Fouriera sygnału poddanego przetwarzaniu. Skuteczność tej metodologii badana jest za pomocą miar odległości cepstralnej (ang. *Cepstral Distance*) oraz ważonego częstotliwościowo poziomego sygnału do szumu (ang. *Frequency Weighted Segmental Signal-to-Noise Ratio*). Zaproponowane miary są w największym stopniu skorelowane z oceną wykorzystywaną w obszarze rozpoznawania mowy i weryfikacji mówcy. Ponadto, wynik badania przydatności segmentacji sygnału w pasmach w detekcji ataków fałszowania i uzyskanie potwierdzenia, że należy stosować cechy ekstrahowane w paśmie wyższych częstotliwości są bardzo wartościowym wynikiem rozprawy doktorskiej.

Po przeczytaniu rozprawy nasuwa się kilka pytań do dyskusji.

1. W jakim stopniu skonstruowane modele są skalowalne, tzn. czy istnieje np. wartość progowa czasu pogłosu (RT), która warunkuje poprawne działanie systemu? W rozdziale 2. i 5. testy uwzględniają różne wielkości parametrów określających pogłos oraz wartość RT, ale wynika to raczej z dostępnych danych źródłowych (największa wartość RT=5,18 s, ale większość wartości mieści się do wartości 1 s).
2. Czy autor sądzi, że powyżej takiej wartości zaproponowane parametry (usuwanie pogłosu/parametryzacja z uwzględnieniem pogłosu) i metryki będą dalej działać?
3. Czy autor rozprawy analizował wpływ struktury pogłosu (wczesne odbicia vs. późne odbicia) na jakość proponowanych cech (tj. skuteczność weryfikacji mówcy; odporność w kontekście wykrywania ataków fałszowania)?

4. Czy wielkość pogłosu jest uśredniana czy brane są uwarunkowania wystroju akustycznego pomieszczenia? Eksperyment nr 1 (rozdział 3) prezentuje podejście, w którym porównane zostały wyniki użycia mikrofonów znajdujących się w różnych odległościach w stosunku do mówcy. Brak jest informacji, jakiego typu pomieszczenie (w kontekście akustyki wnętrza) było symulowane. A wiadomo, że pogłos pomieszczenia warunkuje nie tylko odległość źródło-mikrofon. Warto by w tym miejscu podać też wielkość pogłosu, jeśli taka wartość była znana. Ta sama uwaga dotyczy eksperymentu nr 2 (kontekst normalizacji i-wektora dla sprzężonych ze sobą sygnału mówcy i warunków kanału transmisyjnego). Zadana postać odpowiedzi impulsowych pomieszczeń (RIR) pojawia się przy opisie eksperymentu nr 3. Rozumiem, że wartości wielkości określających symulowane pomieszczenie pojawiły się dopiero w związku z eksperymentem nr 3 w kontekście testowanych strategii ekstrakcji dodatkowych cech mowy i błędu zrównoważonej stopy błędów EER oraz podanych wartości współczynników pochłaniania przy okazji eksperymentu opisanego w rozdziale 5.3.1?
5. Czy długość wypowiedzi mówcy ma wpływ na uzyskane wyniki (trening/test)?
6. Nasuwa się też pytanie dotyczące metod formowania wiązki sygnału (*beamforming*) w przypadku, gdyby mikrofony były ułożone w linii lub na okręgu, itp. Czy taka strategia mogłaby być skuteczniejsza niż losowanie mikrofonu, z którego sygnał do weryfikacji mówcy ma pochodzić?
7. Jaki może być wpływ przemieszczania się mówcy w trakcie weryfikacji w kontekście zaproponowanych strategii?

Podsumowując, według mnie wśród osiągnięć Autora rozprawy doktorskiej należy podkreślić opracowanie całościowej strategii podejścia do weryfikacji mówcy w warunkach pogłosowych obejmującej derewerberację sygnału, jak również zaproponowanie metryk oceniających skuteczność przygotowanych rozwiązań.

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

Układ pracy jest przekonujący, we Wprowadzeniu podane zostały hipotezy badawcze, zaś rozdziały 3-5 stanowią wywód, który umożliwia ich udowodnienie. Rozdziały 2 oraz 3-5 zawierają odniesienie do stanu wiedzy w kontekście omawianych wątków badawczych. Przedstawione we Wprowadzeniu rysunki stanowią czytelną ilustrację rozwiązywanego problemu. Sądzę jednak, że warto by narysować schemat/y blokowy/e pełnego eksperymentu, jakim jest weryfikacja

mówcy w pogłosie warunkowana odległością od mikrofonu przy jednoczesnym zabezpieczeniu przed atakami na system. Natomiast, krótkie podsumowania zawarte w końcowej części rozdziałów 3-5 zapewniają ciągłość przedstawianych wątków badawczych, zwłaszcza, że są jednocześnie wprowadzeniem do kolejnego rozdziału. Wyniki badań zostały przedstawione w sposób zwięzły. Praca jest poprawna od strony redakcyjnej, edycja rozprawy jest bardzo staranna.

Uwaga: obecnie większość prac informatycznych jest publikowana w języku angielskim, stąd brakuje ogólnopolskiej dyskusji nad odpowiednikami wyrażen w j. polskim – obecnie dobrze ugruntowanych, ale tylko w języku angielskim. Dlatego sędzę, że w rozprawie powinno znaleźć się rozszerzone (kilkustronicowe) streszczenie w j. polskim (wymagane m.in. w mojej macierzystej uczelni), które stanowiłoby przyczynek do takiej dyskusji.

6. Jaka jest przydatność rozprawy dla dyscypliny?

Rozprawa ma charakter wielowątkowy, chociaż każdy z badanych elementów jest ściśle powiązany ze sobą. Nie trzeba nikogo przekonywać, że bezpieczeństwo systemów weryfikacji mówcy i ich ochrona przed atakami fałszowania, w szczególności działających często w warunkach trudnych akustycznie jest bardzo istotne w każdym omawianym w rozprawie aspekcie. Aktualność tematyki rozprawy jest silnie potwierdzona przez liczne źródła literaturowe (i technologie), w tym prace opublikowane przez autora rozprawy, które wskazują na wyższą skuteczność w stosunku do stanu wiedzy. Prowadzone badania wpisują się dobrze w dyscyplinę, w której doktoryzuje się p. Marcin Witkowski. Już z obecnie widoczne są liczne cytowania do jednej z prac autora.

Podsumowanie

W podsumowaniu stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji rozprawa doktorska p. Marcina Witkowskiego **spełnia z nadmiarem wymagania** stawiane rozprawom doktorskim w aktualnie obowiązującej Ustawie o stopniach i tytule naukowym. W związku z tym **wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej p. mgra inż. Marcina Witkowskiego do publicznej obrony.**

Ze względu na osiągnięte w rozprawie wyniki, które zostały opublikowane w czasopiśmie i na prestiżowych konferencjach tematycznych – **wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

Bożena Jankó