

### **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Macieja PAWEŁCZYKA pt.: „Aviation Engineering Applications of Artificial Intelligence for UAV Detection and Gas Turbine Predictive Maintenance”**

#### **1. Podstawa opracowania**

Decyzja Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej z dnia 2 czerwca 2021 r, dotycząca sporządzenia recenzji rozprawy doktorskiej zgodnie z wymogami ustawy z dnia 20 lipca 2018 r.

#### **2. Zakres pracy**

Podjęty przez Kandydata do stopnia doktora nauk technicznych problem zastosowania sztucznej inteligencji do wykrywania bezałogowych obiektów latających (UAV) i nadzorowanych obsług turbin gazowych w technice lotniczej, jest zagadnieniem złożonym z punktu widzenia naukowo badawczego i niezwykle ważnym ze względów użytkowych. Wyniki badań przedstawione w rozprawie, mogą być wykorzystane przez konstruktorów, ekspertów jak i ludzi nauki, którzy próbują w swoich rozważaniach opracować najlepszą koncepcję identyfikacji i wykrywania UAV oraz nadzorowania eksploatacji poprzez szeroko rozumiane metody uczenia maszynowego wykorzystując sztuczne sieci neuronowe w obszarze inżynierii lotniczej dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

Przedstawione w rozprawie badania obejmują gruntowną analizę procesu wykrywania obiektów pod kątem zastosowań lotniczych, należy wspomnieć, że pierwotnie proces ten ukierunkowany był na detekcję uszkodzeń turbin gazowych - co słusznie zauważył Autor recenzowanej rozprawy.

W rozważaniach naukowych Autor wykorzystuje nie tylko komercyjne oprogramowanie ale również własne opracowane modele do testowania, wykonania analiz, a które pośrednio realizują proces detekcji niewielkich, rozmytych obiektów o różnorodnym kształcie i na różnorodnym tle, co stanowi wartość dodaną w rozpatrywanym obszarze. Autor słusznie



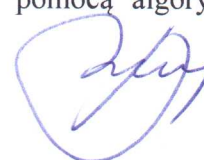
stwierdza, że wykrycie takich defektów jak: pęknięcia, rysy, przepalenia to podstawowy cel inspekcji boroskopowej turbiny gazowej.

Cennym elementem recenzji rozprawy jest fakt przedstawienia szeregu modeli uczenia maszynowego oraz zaprezentowano alternatywne metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe. Autor dokonał analizy zmiennych, które mają decydujący wpływ do utworzenia adekwatnego modelu regresyjnego na potrzeby procesu eksploatacji techniki lotniczej.

Praca liczy 195 stron i składa się z następujących elementów: streszczenia, spisu rysunków, spisu tabel, pięciu rozdziałów, wniosków, obszernej bibliografii oraz załączników, które stanowią integralną część całości przedstawionej do recenzji rozprawy. Rozprawa jest skoncentrowana na zagadnieniach związanych z tworzeniem algorytmów detekcji dronów poprzez wykorzystanie idei sztucznych sieci neuronowych oraz zaproponowano nową metodę detekcji i kontroli parametrów pracy zespołów napędowych. Praca obejmuje multidyscyplinarne podejście do procesu opracowania optymalnego rozwiązania skierowanego na udowodnienie sformułowanej tezy i postawionych celów badawczych.

Należy stwierdzić, że Autor w oparciu o analizy najnowszych rozwiązań w zakresie detekcji obiektów UAV i ogólnego procesu eksploatacji sformułował następujący główny cel badawczy, który brzmi: *„zaproponowanie i opracowanie wzorców do porównywania metod uczenia maszynowego oraz zdefiniowanie optymalnych parametrów modelu dla występujących przypadków poprzez ich klasyfikację i metodę regresji w zastosowaniach inżynierii lotniczej wykorzystując identyfikowanie problemów i proponowanie rozwiązań, w zakresie wykrywania UAV i wyzwań związanych z eksploatacją turbin gazowych”* (zwiększenie dostępności kontroli parametrów i obniżenie kosztów eksploatacji poprzez dane z detektorów). Autor rozprawy kreśląc główny cel badawczy i pomocnicze cele określił tezę: *„Metody uczenia maszynowego mogą być z powodzeniem stosowane w rzeczywistych wyzwaniach inżynierii lotniczej związanych z klasyfikacją i regresją pomimo problemów związanych z niedoborem danych, akwizycją danych, określeniem optymalnego poziomu ufności, możliwym do określenia rozmiarem danych i krytycznymi hiperparametrami”*.

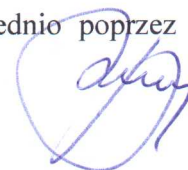
W recenzowanej rozprawie Autor opracował nowatorski zestaw danych składających się z obiektów UAV, dla modelu skutecznego uczenia maszynowego zdolnego do wykrywania obiektów UAV w trudnych warunkach (identyfikacji obrazowej). Proces ten wymagał zdefiniowania odpowiednich ram dla oznakowania każdego obrazu UAV jednoznacznie poprzez określenie wymaganego czasu i umożliwiając jasną i spójną definicję kolejek i zestawów testowych do wykorzystania w procesie tworzenia algorytmu. Istotnym elementem pracy jest opracowany test porównawczy wykrywania obiektów za pomocą algorytmu



kaskadowego Haar, który był niezbędny do opracowania szeregu modeli identyfikacji obiektów. Cennym elementem rozprawy jest przedstawiony problem dostosowania modelu wykrywania obiektów w oparciu o proces Deep Learning aby zapewnić właściwe odniesienie dla zastosowań przemysłowych dotyczących problemów identyfikacji obiektów opartych na uczeniu maszynowym przy użyciu wiarygodnych danych referencyjnych i regulacji hiperparametrów. Przedstawiony w rozprawie tok naukowych rozważań jest dobrze logicznie uwarunkowany a dokonana implementacja algorytmu uczenia maszynowego do osiągnięcia celu w zakresie inżynierii mechanicznej bazując na przewidywaniu zmian kluczowych parametrów pracy zespołu napędowego stanowi wartość dodaną w rozpatrywanym obszarze ogólnie pojętego lotnictwa.

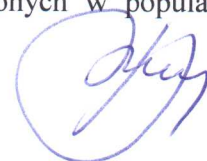
Rozdział pierwszy zatytułowany *Introduction* podzielono na pięć podrozdziałów w których przedstawiono podłoże podjętych rozważań naukowych na tle pojawiających się problemów identyfikacji i wykrywania UAV oraz szeroko rozumianej eksploatacji zespołów napędowych. W pracy Autor zwrócił uwagę na istotę naukowego problemu predykcyjnej eksploatacji zespołów napędowych, który należy rozwiązać, zastosować w procesie przewidywania stanów koncentrując się na zespole turbiny gazowej, i tu Autor rozprawy dokonał stosownego podziału rozpatrywanych problemów odnosząc się do literatury, a które należy wzbogacić o procedury multidyscyplinarnego podejścia do udowodnienia tezy rozprawy poprzez realizację zadań badawczych. W kolejnych zdaniach zwięzłej notatki odwołano się pośrednio do idei rozwoju procesu maszynowego uczenia (Deep Learning). Przeprowadzone w rozprawie rozważania dotyczące literaturowych problemów, które jasno wskazują trudne etapy pojawiające się podczas opracowywania algorytmów opartych o sztuczne sieci neuronowe. Zamieszczone podrozdziały w rozdziale pierwszym podkreślają wagę problemu i ogrom pracy jaką należy włożyć aby osiągnąć cel. Należy stwierdzić, że na tle przeprowadzonych rozważań w tym rozdziale przygotowano grunt pod proces udowodnienia tezy rozprawy.

W rozdziale drugim pt. *Research Background* Autor w jasny sposób przedstawia podłoże zrealizowanej rozprawy doktorskiej. Przedstawiono idee algorytmicznego podejścia do procesu Deep Learning w zagadnieniach poszukiwania rozwiązania spełniającego narzucone kryteria w odniesieniu do metod analitycznych, metod dziedziczenia. W rozdziale tym został przedstawiony ogólny schemat podejścia do formułowania problemu i wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do detekcji i identyfikacji bezzałogowych statków powietrznych (UAV). W rozdziale tym Autor odniósł się bezpośrednio poprzez bogaty



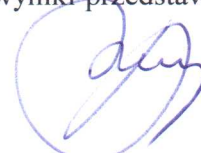
przegląd literatury do porównania metod AlexNet, VGG16, VGG19, LeNet-5 oraz ResNet, które są dostępne w systemie otwartym (open source). Cennym elementem tego rozdziału są jasno przeprowadzone rozważania dotyczące wymagań sprzętowych, systemowych, struktury danych oraz formowania źródła zapisu algorytmów, co niewątpliwie jest istotnym elementem rozwoju metod opartych na sztucznych sieciach neuronowych. Rozdział zawiera klarowny opis idei sztucznych sieci neuronowych poprzez odniesienie się do czterech podstawowych kroków iteracyjnych uczenia modeli. Kolejne podrozdziały bazując na wcześniej przedstawionych rozważaniach dotycząc ogólnego problemu wykrywania obiektów UAV na bazie analizy obrazów. Rozdział zawiera szczegółowy przegląd modeli opartych na kaskadzie Haara i konwolucyjnych sieciach neuronowych (Convolutional Neural Network). Autor rozprawy przedstawił ogólne ramy rozszerzania zbioru danych (pełna analiza tła zawarta w załączniku A rozprawy doktorskiej). Rozdział został zakończony definicją metryk używanych do oceny wykonanych eksperymentów. Należy stwierdzić, że rozdział drugi stanowi swoistego rodzaju przegląd literatury i metod stosowanych obecnie w procesach rozwoju i wykorzystania sztucznej inteligencji w obszarze techniki lotniczej.

Rozdział trzeci pt. *Dataset Generation* przedstawia proces testowania i modyfikacji modeli matematycznych do udowodnienia postawionej tezy pracy, a który należy do niezbędnych elementów zmierzających do rozwiązania problemów badawczych. W rozdziale tym Autor przedstawił metodę akwizycji zestawu danych wraz z opracowanym zbiorem danych wykrywania dronów. Rozdział jest podzielony na pięć podrozdziałów, w których Autor jasno przedstawił przegląd procesu przygotowania danych począwszy od utworzenia niestandardowego modelu opartego na sztucznych sieciach neuronowych (ANN) przy użyciu ręcznie oznaczonych obrazów. Bazując na uzyskanych danych próbkach uczących i testowych opracowane modele zostały wykorzystane do przyspieszenia procesu generowania zestawu danych w procesie półautomatycznym. Przedstawiono nowatorskie rozwiązanie eliminacji niedogodności generowania danych. Opracowano nowy duży zbiór danych dla szeroko zakrojonych badań nad wydajnymi systemami wykrywania UAV poprzez wykorzystanie publicznie dostępnych materiałów zarejestrowanych systemem UAV, pobranych z Internetu, jak i wykonanych osobiście przez Autora co wpłynęło poprawnie na proces rozwoju modelu do detekcji i uchwycenia rzeczywistych niedoskonałości identyfikowanych obiektów. Przedstawiono algorytm znakowania w nowym wdrożonym zautomatyzowanym procesie etykietowania oraz bezpośrednio odniesiono się do jego zalet w operacji identyfikacji obrazu. Przedstawiono proces generowanie zestawu danych treningowych, które pochodzą z 578 filmów z dronów zamieszczonych w popularnych



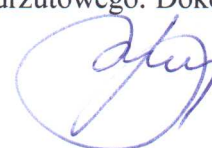
serwisach wideo. Zaprezentowano proces organizowania zbioru danych dronów różnych typów, rozmiarów, podziałki odwzorowania, pozycji, środowiska, pór dnia itp., aby umożliwić szeroki zakres reprezentacji do trenowania modeli wykrywania obiektów. Rozdział zawiera proces testowania danych, wdrażania modelu uczenia maszynowego. Należy wspomnieć, że aby udowodnić tezę pracy Autor rozprawy musiał zgłębić metody: komputerowego modelowania, metody identyfikacji obrazów, systemu sztucznych sieci neuronowych ich sposobu uczenia dla uzyskania optymalnego rozwiązania co jest wartością dodaną w rozpatrywanym obszarze badawczym.

Rozdział czwarty pt. *UAV Detection Methods—Experimental Results and Comparisons* przedstawia wyniki wykrywania obiektów UAV. Zaprezentowano modele detekcji utworzone przy użyciu nowatorskiego zestawu danych oraz metody akwizycji danych przedstawionych w rozdziale trzecim. W rozdziale tym Autor prezentuje przykłady wykrywania obiektów, które przedstawiają aktualny stan wiedzy w zakresie dokładności ogólnie pojętej identyfikacji przy użyciu różnych technik w szczególności technik opartych na Deep Learning. Przedstawiony proces posłużył do wyboru optymalnego modelu dla eksperymentów udokumentowanych w rozprawie. Autor zaprezentował wyniki wykrywania obiektów bazując na kaskadzie Haar będącym testem porównawczym dla innych metod przedstawionych w rozdziale, a także w celu prezentacji wyników wykrywania dla prostego do wdrożenia modelu wykorzystując strukturę OpenCV. Opracowana i przedstawiona w rozprawie metoda pozwala na implementację uzyskanych modeli dla różnych systemów. Przedstawione w rozdziale badania prezentują obecnie dostępne kompleksowe podejście do wykrywania dronów. Cennym elementem tego rozdziału jest fakt, że wszystkie zbiory danych i analizowane modele uczenia maszynowego przedstawione w tym rozdziale zostały udostępnione do publicznego wglądu. Omówiono proces i ewolucję algorytmu tworzenia kaskad Haara, lokalne wzorce binarne, metody trenowania kaskady do wykrywania dronów. Autor rozprawy porównał uzyskane wyniki autorskimi algorytmami z wynikami uzyskanymi według metodyki zaprezentowanej przez Viola i Jonesa z 2001 roku. Przedstawiono wady i zalety uczenia maszynowego opierając się na kaskadach Haara. Stwierdzono, że kaskady Haara są dobre w procesie wykrywania średniej wielkości dronów na tle określonych warunków pogodowych co niewątpliwie pobudza do opracowania nowego podejścia do przedmiotowego zagadnienia. Przedstawiono proces wykrywania obiektów w oparciu o sztuczne sieci neuronowe. Dla każdego analizowanego modelu wyznaczono charakterystyki MCC, dokładności, F1 oraz inne niezbędne wielkości do oceny modelu, a wyniki przedstawiono na



odpowiednich wykresach. Cennym elementem tego rozdziału jest fakt, że zaprezentowano proces optymalizacji hiperprzestrzeni wykorzystując podejście wstępnie przeszkolonych modeli „TensorFlow”, które są wydajniejsze niż trenowanie zupełnie nowej warstwy od początku, co niewątpliwie jest dobrym podejściem ponieważ omawiana metoda została adoptowana do takiej aplikacji jak COCO (Common Objects in Context), która umożliwia wykrywanie wielu obiektów codziennego użytku, począwszy od zwierząt, narzędzi, obiekty transportu po sygnalizację świetlną i jest wzorcowym systemem do porównywania różnych architektur Deep Learning. Przeprowadzono symulacje przy użyciu 10 partii obrazów dla miliona iteracji ciągłego treningu. Wyniki uzyskane na podstawie testowego zbioru danych przedstawiono w tabeli 3 str. 108. Dokonano porównania modelu detekcji kaskadowej Haara i stwierdzono, że Deep Learning daje lepsze wyniki, co pozwala na bardziej rzetelną ocenę uzyskanych rezultatów przy użyciu takich parametrów jak ROC i AUC, parametry te zostały przedstawione w tabeli 4 str. 109. Przedstawiono modele detekcji w konfrontacji z rzeczywistością a wyniki przedstawiono w postaci odpowiednich charakterystyk korelacji pomiędzy uczeniem i wykrywaniem. Porównano architektury bazujące na systemie sztucznych sieci neuronowych uwypuklono wady i zalety oraz stały się podstawą do wnioskowania o opracowanie swobodnego algorytmu do rozwiązania zadania badawczego. Rozdział zawiera interesujące wyniki istotne z punktu widzenia użytkownika, dla którego wynik końcowy i wydajność jest głównym wyznacznikiem jakości modelu. W tabeli 8 zamieszczono wyniki dla 10 najlepszych modeli (w oparciu o wynik F1). Autor przedstawił rezultaty z eksperymentu zastosowania sztucznych sieci neuronowych do wyznaczenia optymalnej liczby obrazów niezbędnych do identyfikacji obiektu. W rozdziale czwartym porównano modele oparte o technologię sztucznych sieci neuronów, wyniki przedstawiono na stosownych charakterystykach jakościowych. Cennym elementem tego rozdziału jest wykonana analiza wrażliwości modelu oraz wpływu zmiany wymiarów obrazu na wydajność modelu opartego o system sztucznych sieci neuronowych. Całość rozdziału podsumowują wnioski z przeprowadzonych badań nad wykrywaniem obiektów UAV, doświadczenie uzyskane z procesu wykrywania dronów będzie wykorzystane do wykrywania/identyfikacji uszkodzeń turbin gazowych eliminując inspekcje boroskopowe, które są czasochłonne w procesie ogólnie pojętej eksploatacji.

Rozdział piąty pt. *Machine Learning for Gas Turbine Predictive Maintenance* jest w całości poświęcony udowodnieniu tezy rozprawy doktorskiej (z dobrym skutkiem). Autor przedstawił problem kontroli parametrów pracy turbinowego silnika odrzutowego. Dokonano



przeglądu tradycyjnych i nowoczesnych metod prognozowania charakterystyk pracy turbin gazowych oraz ich głównych stanów awaryjnych. Wykonano porównanie modeli prognozowania bazując na uczeniu maszynowym w oparciu o sztuczne sieci neuronowe. Autor zaprezentował badania koncentrujące się na poziomie kontroli parametrów dwustopniowej turbiny gazowej (wysokiego i niskiego ciśnienia). Rozdział zawiera szczegółowy opis badanego problemu oraz matematyczne podstawy analizowanych metod. Przedstawiono wyniki z implementowanych modeli uczenia maszynowego, które są zadawalające w porównaniu do wyników uzyskanych przy użyciu modeli Random Forest i Gradient Boosting Regression oraz omówiono znaczenie regulacji hiperparametrów. Przedstawiono proces walidacji modelu na podstawie danych zarejestrowanych w procesie eksploatacji turbiny gazowej. W oparciu o opracowany model zaprezentowano nową metodę wspomagającą proces planowania przeglądów prewencyjnych zespołów turbin gazowych, co w konsekwencji prowadzi do poprawienia jakości eksploatacji zespołu napędowego. Całość rozdziału jest podsumowana trafnymi wnioskami dotyczącymi testowania algorytmów dla zastosowania praktycznego.

Rozdział szósty pt. *Conclusions* zawiera spostrzeżenia z przeprowadzonych badań modeli opartych na sztucznych sieciach neuronowych. Podkreślono zrealizowanie rozbudowanego celu badawczego przedstawionej do recenzji rozprawy. Przytoczono problem opłacalności wykrywania małych obiektów na zróżnicowanym tle z wykorzystaniem podejścia *Machine Learning i Deep Learning* wraz z problemami i rozwiązaniami dotyczącymi pozyskiwania zbiorów danych do wykrywania/identyfikacji UAV oraz zastosowania opracowanych algorytmów do przewidywania/kontroli parametrów pracy zespołów napędowych. Autor w podsumowaniu jasno podkreśla sens praktyczny i naukowy opracowanych algorytmów oraz pośrednio nakreślił kierunki dalszych przyszłościowych badań.

### 3. Ocena pracy

Zasadnicza wartość recenzowanej rozprawy jest związana z umiejętnym zastosowaniem przez Autora pracy formalizmu metod: algorytmizacji, modelowania opartego na sztucznych sieciach neuronów, optymalizacji i implementacji ich poprzez opracowanie własnych algorytmów do komputerowych systemów identyfikacji obiektów i predykcji kluczowych parametrów zespołów silników lotniczych.

Należy stwierdzić, że praca ma charakter aplikacyjny o bardzo dużym znaczeniu praktycznym. Jej walorem jest to, iż składa się z części modelowania matematycznego/systemowego i analityczno-eksperymentalnej zamieszczonych w



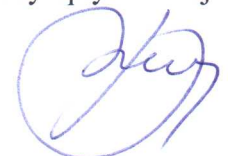
7

rozdziałach recenzowanej rozprawy, a które wzajemnie się uzupełniają tworząc logiczną całość. Doktorant poszukiwał rozwiązań zagadnień praktycznych, o dużym znaczeniu poznawczym mającym zastosowanie w procesie identyfikacji i diagnozowania wykorzystując najnowsze metody uczenia maszynowego w zastosowaniu dla inżynierii mechanicznej. Prezentowane w pracy wyniki mają odpowiednie odniesienie do wnikliwie analizowanej literatury, ale stanowią własne oryginalne podejście do udowodnienia tezy rozprawy. Należy zauważyć, że zaprezentowany proces tworzenia algorytmu wykrywania/identyfikacji UAV, opracowanie nowej półautomatycznej metody etykietowania zdjęć, określenie optymalnego poziomu pewności detekcji dla różnych modeli, testowanie modeli referencyjnych na opracowanych zbiorach, opracowanie metody opartej na uczeniu maszynowym do prognozowania parametrów pracy zespołu turbiny gazowej i udowodnienie tezy rozprawy zapisano na 195 stronach w przedstawionej do recenzji rozprawie, a stanowi to tylko skrót z ogromu pracy jaką Autor musiał włożyć aby powstała aplikacyjnie tak dobra metoda wspomagająca proces wykrywania UAV oraz kontroli parametrów zespołu napędowego.

Rozprawa zawiera efektywne rozwiązania ważnego zagadnienia naukowego. Jej istotną cechą jest fakt, że może być wykorzystana w dyscyplinie naukowej inżynierii mechanicznej np. w procesie projektowania, w procesie syntezy systemów wykrywania obiektów oraz badaniach stanu maszyn wirnikowych. Warto wspomnieć, że przeprowadzone symulacje i uzyskane wyniki w pełni podkreślają, że została opracowana metoda bazująca na sztucznej inteligencji w zastosowaniu do kontroli techniki lotniczej. Autor rozprawy rozwiązał postawione zagadnienie stosując własne algorytmy, metody obliczeniowe, autorskie zbiory danych oraz zastosował aparat matematyczny odpowiadający współczesnym pracom doktorskim. Należy podkreślić, że zastosowanie nowoczesnych technik symulacyjnych do badania walorów systemów opartych o sztuczne sieci neuronowe w procesie rozwoju algorytmów uczenia maszynowego podkreślają duże umiejętności Autora w obszarze wykorzystania sztucznej inteligencji do zastosowań praktycznych. Wyniki pracy są wartościowe z punktu widzenia zastosowań badawczych (naukowych), inżynierskich w procesach projektowania oraz dalekosiężnych analiz ogólnie pojętej żywotności struktur lotniczych.

#### Uwagi do rozprawy

Drobna uwaga dotycząca rozprawy wynika z faktu niewyraźnych opisów na zamieszczonych rysunkach co utrudnia śledzenie toku postępowania nakreślonego przez Autora rozprawy. W pracy często pojawia się sformułowanie „optymalny”, „optymalizacja”, - i tu brak zamieszczenia w pracy krótkiej informacji o zastosowaniu metody optymalizacji dla





rozważanych problemów (jakie metody wykorzystano). W przedłożonej rozprawie wspomniana niedogodność jest pośrednio wyjaśniana ale w różnych miejscach recenzowanej rozprawy, co utrudnia szybkie śledzenie toku postępowania.

#### **4. Wnioski**

Rozprawa napisana jest bardzo starannie i czytelnie oraz wskazuje na duży zasób wiedzy i umiejętności Autora w zakresie: sztucznej inteligencji, algorytmizacji procesów identyfikacji, modelowania matematycznego, symulacji komputerowych. Biorąc pod uwagę wartości poznawcze i użytkowe uzyskanych rezultatów, dojrzałość merytoryczną mgr. inż. Macieja PAWEŁCZYKA w zakresie zastosowania sztucznej inteligencji w dyscyplinie inżynieria mechaniczna do wykrywania obiektów UAV i prognozowania stanu turbin gazowych, recenzowaną rozprawę oceniam bardzo wysoko. Zasługuje ona na wyróżnienie i wnioskuje o jej wyróżnienie. Uzasadnienie wyróżnienia pracy zawarte jest powyżej w treści recenzji.

Praca spełnia wymagania stawiane przez ustawę z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” art. 187 i może stanowić podstawę dopuszczenia do egzaminu w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna i publicznej obrony.

*Janisław Kuchel*  
