

Zabrze, 23.06.2025 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mateusza Troki
pod tytułem

***Unsupervised Machine Learning in Biomechanical Data Analysis.
Medical Application of Self-Organising Maps***

1. Przedmiot rozprawy

Przedmiotem oceny jest rozprawa doktorska mgr. inż. Mateusza Troki pt.: *Unsupervised Machine Learning in Biomechanical Data Analysis. Medical Application of Self-Organising Maps* (pol. *Nienadzorowane Uczenie Maszynowe w Analizie Danych Biomechanicznych. Medyczne Zastosowanie Map Samoorganizujących*) napisana w języku angielskim pod opieką naukową dr hab. inż. Izabeli Lubowieckiej, prof. PG. Formalną podstawę opracowania stanowi pismo przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna prof. dr. hab. inż. Michała Wasilczuka nr l.dz. 045/WIMiO/2025 i uchwała Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej oraz dołączona do niego rozprawa doktorska, które otrzymano dnia 25.04.2025 r.

Zagadnienia poruszane w pracy dotyczą wykorzystania nienadzorowanego uczenia maszynowego, a w szczególności Map Samoorganizujących (SOM) do analizy złożonych danych biomechanicznych. Zastosowanie modelu nienadzorowanej sieci neuronowej do grupowania i wizualizacji eksperymentalnie uzyskanych danych biomechanicznych na podstawie ich podobieństwa stanowi główny cel poznawczy w odkrywaniu ukrytych cech w zbiorach danych, które nie są łatwo dostrzegalne tradycyjnymi metodami. Zaawansowane techniki uczenia maszynowego SOM, zostały wykorzystane w pracy do analizy i identyfikacji podobieństwa zachowania mechanicznego obszarów ściany brzusznej, a także do analizy aktywacji mięśni stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ). Klasyfikacja danych z pomiarów *in vivo*, zarówno pola przemieszczeń ściany brzusznej uzyskanych za pomocą cyfrowej korelacji obrazu (DIC) oraz sygnałów elektromiografii powierzchniowej (sEMG) mięśni wokół stawu TMJ, umożliwiła zrozumienie problemów związanych z funkcjonalnością biomechaniczną tych układów. Wyniki oraz potencjał takiego podejścia przyczynia się do rozwoju i wspierania spersonalizowanych rozwiązań diagnostycznych i terapeutycznych indywidualnie dopasowanych do danego pacjenta. Dlatego uważam, że tematyka rozprawy doktorskiej jest ważna i aktualna, gdyż poruszane są w niej zagadnienia dotyczące identyfikacji wzorców i ukrytych cech bez konieczności wcześniejszego posiadania pełnej wiedzy o strukturze danych. Jest to szczególnie cenne w biomechanice, gdzie zmienność międzyosobnicza i złożoność fizjologiczna sprawiają, że precyzyjne, z góry określone kategorie są trudne do ustalenia. Nowatorskie zastosowanie SOM do identyfikacji regionów o podobnym zachowaniu mechanicznym dostarcza cennych informacji, które mogą przyczynić się do opracowania i rozwoju nowych narzędzi do kategoryzacji i zrozumienia reakcji złożonych systemów (bio)mechanicznych. Również ze względu na naukowo-aplikacyjny charakter badań stwierdzam, że mieści się ona w obszarze naukowym, który wpisuje się w dyscyplinę: inżynieria mechaniczna.

2. Ocena struktury i układu rozprawy

Recenzowana praca obejmuje 134 strony maszynopisu w formie zwartej monografii zawierającej streszczenia w języku polskim i angielskim, spisy treści, rysunków, tablic oraz literatury. Treść pracy została podzielona na 7 rozdziałów i w nich zawartych podrozdziałów. Praca rozpoczyna się od rozdziału zatytułowanego Introduction (1). Kolejne rozdziały posiadają następujące tytuły: State of

the Art (2); Unsupervised Machine Learning (3); Deformation Definition and Measures (4); Human Abdominal Wall (5); Temporomandibular Joint (6); Summary and Future Work (7). Bibliografia składa się z 96 pozycji literaturowych, a spisy rysunków i tabel zawierają odpowiednio 94 rysunków i 10 tabel z wynikami.

W pierwszym rozdziale Autor sformułował tezę dysertacji, która zakłada, że zastosowanie nienadzorowanego modelu uczenia maszynowego, jakim są Mapy Samoorganizujące (SOM), w analizie eksperymentalnie pozyskanych danych biomechanicznych, oferuje nowatorskie podejście do odkrywania ukrytych cech w zbiorach danych. Naświetlił dwa główne problemy, do których zastosowano tę metodologię. Analizę SOM zapoczątkował od identyfikacji obszarów ściany brzucha człowieka, które wykazują podobne zachowanie mechaniczne, wykorzystując pełnopolowe pomiary cyfrowej korelacji obrazu (DIC) w dynamicznych warunkach obciążenia. Dodatkowo skupił się na ocenie potencjalnej dysfunkcji stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ) poprzez analizę sygnałów elektromiografii powierzchniowej (sEMG) z mięśni otaczających staw. Oryginalność podejścia i znaczenie badań szczególnie w kontekście znaczącego ulepszenia diagnostyki i umożliwienia kreowania spersonalizowanych procedur leczenia również w nim zostały uzasadnione.

W drugim rozdziale został przedstawiony przegląd literatury dotyczącej zastosowań uczenia maszynowego w biomechanice z omówieniem ogólnych trendów, ze szczególnym uwzględnieniem problemów ściany brzusznej oraz stawu skroniowo-żuchwowego. Autor zaprezentował szczegółowe informacje na temat zastosowania uczenia maszynowego z odniesieniami do aktualnych badań. Dla lepszego zrozumienia uczenia maszynowego Autor skoncentrował się na specyficznych zastosowaniach i przedstawił badania dotyczące przewidywania wyników i powikłań po rekonstrukcji ściany brzusznej, a także badania do przewidywania i diagnozowania zaburzeń TMJ. Ponadto, dokonał przeglądu różnorodnych technik i algorytmów ML, a także opisał modele sztucznej inteligencji w tym głębokiego uczenia (deep learning) i generatywnych sieci przeciwnych (GAN) oraz systemy wspomagania decyzji oparte na sieciach neuronowych. Przedstawiony przegląd literatury stanowi rzetelną prezentację aktualnego stanu wiedzy, co jest kluczowe dla tak dynamicznie rozwijającej się dziedziny, jaką jest uczenie maszynowe. Ponadto, przedstawia najnowsze osiągnięcia naukowe, na co wskazuje większość cytowanych prac, które pochodzą z lat 2020-2024.

W trzecim rozdziale zostały szczegółowo omówione teoretyczne podstawy Map Samoorganizujących (SOM), a także wyzwania związanych z analizą klastrow, w tym wyboru miar odległości i oceny jakości grupowania danych. Podkreślono w nim również, że w zależności od typu danych oraz celu analizy określenie optymalnej liczby klastrow, a także wybór odpowiedniej miary odległości stanowi kluczowy problem decyzyjny, gdyż mogą wpływać na wyniki, zwłaszcza w przypadku wielowymiarowych, potencjalnie skorelowanych i nieliniowo powiązanych danych biomechanicznych. Na podstawie tych informacji Autor dokonał implementacji SOM do własnych badań uzasadniając jej użyteczność, zwłaszcza w analizach eksploracyjnych. W jego przekonaniu zastosowana metoda - uczenia maszynowego (strategia badawcza), choć statystycznie suboptymalna, może prowadzić do użytecznych wniosków i ich interpretowalności na potrzeby praktyków/medyków.

W czwartym rozdziale przedstawiono podstawy teoretyczne mechaniki ciała stałego. W nim szczegółowo omówiono fundamentalne pojęcia/twierdzenia odnoszące się do naprężenia, odkształcenia i deformacji ciała, a które Autor stosuje w swojej pracy. Natomiast rozdział piąty i szósty stanowią główną część badań własnych Autora.

Rozdział 5 dysertacji zawiera szczegółowe badania biomechaniki ludzkiej ściany brzusznej z zastosowaniem Map Samoorganizujących (SOM), koncentrując się na danych eksperymentalnych zebranych *in vivo* i analizie uzyskanych wyników. Autor przedstawił w nim metodologię badań eksperymentalnych z użyciem Cyfrowej Korelacji Obrazu (DIC) wraz z opisem procesu akwizycji przemieszczeń brzucha podczas oddychania i dializy otrzewnowej (DO). Analiza pola przemieszczeń w oprogramowaniu Istra 4.7 pozwoliła na określenie trójwymiarowych odkształceń powierzchni ściany

brzuszej. Uzyskane pełnopolowe odkształcenia ludzkiej ściany brzusznej do analizy z wykorzystaniem Samoorganizujących Map zostały ustandaryzowane, a następnie poddane klasteryzacji. Analizę z wykorzystaniem SOM przeprowadzono dla różnych wariantów oraz zmiennych. Następnie, przedstawiono szczegółowe wyniki zastosowania SOM do danych biomechanicznych ściany brzusznej i zademonstrowano zidentyfikowane klastry reprezentujące strefy/regiony na powierzchni ściany brzusznej o podobnym zachowaniu mechanicznym pod zmiennym obciążeniem. Uzyskane wyniki (mapowane klastry) dostarczają cennych informacji, gdyż nie tylko skutecznie identyfikują regiony o podobnym zachowaniu mechanicznym w ścianie brzusznej, ale pozwalają ujawnić głębsze wzorce i korelacje, jak np. rozróżnianie cech anatomicznych, takich jak oś środkowo-boczna, kresa biała czy obszar wokół pępka, co może to być pierwszym krokiem do spersonalizowanego podejścia w diagnostyce i planowaniu/dopasowaniu terapii.

W kolejnym rozdziale Autor koncentruje się na ocenie pracy mięśni otaczających staw skroniowo-żuchwowy u ludzi na podstawie pomiarów ich aktywacji. Zbiorem danych do analizy SOM stanowiły sygnały elektromiografii powierzchniowej (sEMG) zarejestrowane z czterech mięśni powierzchniowych: prawego i lewego mięśnia żwacza oraz przednich części prawego i lewego mięśnia skroniowego. Sygnały sEMG pozyskano z badań realizowanych w ramach projektu 3D-JAW, w których wzięło udział pięciu ochotników. Do analizy i oceny aktywności mięśniowej na różnych etapach ruchu żuchwy oraz identyfikacji podobieństw dane sEMG zostały znormalizowane i ustrukturyzowane. Analiza SOM umożliwiła zidentyfikowanie spójnych, indywidualnych wzorców, na podstawie specyficznych formacji klastrów powtarzających się dla tych samych ochotników, co może wskazywać na unikalne wzorce aktywności mięśniowej. Zastosowanie SOM umożliwiło wgląd w potencjalne problemy związane z aktywnością mięśni okołostawowych i funkcjonalnością samego stawu TMJ. Uzyskane wyniki pokazują znaczny potencjał proponowanego rozwiązania do tworzenia narzędzi wspomagających diagnostykę medyczną i planowania zindywidualizowanych procedur leczenia dysfunkcji TMJ, a także monitorowania aktywności mięśniowej podczas leczenia.

W rozdziale (7) ostatnim Autor dokonał podsumowania pracy i sformułował wnioski końcowe, a także przedstawił perspektywy dalszych badań. Na podstawie otrzymanych wyników ze wszystkich przeprowadzonych/zrealizowanych badań/zadań stwierdza, że metody oparte na uczeniu maszynowym, zwłaszcza SOM, mogą być efektywnie stosowane do analizy problemów biomechanicznych. Zastosowanie SOM z powodzeniem umożliwiło zidentyfikowanie regionów o podobnym zachowaniu mechanicznym ścian brzucha pacjentów. Natomiast, klasteryzacja (SOM) sygnałów sEMG mięśni otaczających TMJ umożliwiła mapowanie i wizualizację aktywacji mięśni podczas rzeczywistych ruchów żuchwy, ułatwiając identyfikację podobieństw (indywidualnych wzorców) i różnic między osobami. Jednakże, Autor zauważa i naświetla ograniczenia SOM i czynniki, które mogą wpływać na ogólność wniosków/wyników. Zwraca uwagę na liczebność prób w zbiorach badawczych, gdyż niedostateczna reprezentacja zmienności danych, może istotnie wpływać na zdefiniowane klastry wzorcowe. Dla przykładu, niedostateczna reprezentacja kobiet, może wpływać na zmienność demograficzną i wzorce oddychania, czy też pominięcie głębszych mięśni, kluczowych dla funkcji TMJ, a także brak pacjentów z klinicznie zdiagnozowanymi dysfunkcjami może ograniczać wnioskowanie.

Przedstawioną rozprawę doktorską pod względem poziomu edytorskiego oceniam bardzo pozytywnie. Należy przy tym podkreślić dbałość Doktoranta o stronę redakcyjną pracy, której dużą zaletą jest obszerna oprawa ilustratorska/graficzna, co sprawia, że recenzowaną dysertację czyta się z dużą przyjemnością.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy można zauważyć, że zawiera ona badania *in silico* z zastosowaniem Map Samoorganizujących (SOM) do eksploracji eksperymentalnie uzyskanych danych biomechanicznych. Analizy oparte na uczeniu maszynowym oferują nowatorskie podejście do odkrywania ukrytych cech w zbiorach danych, tym samym stają się źródłem nowej wiedzy i dostarczają cennych informacji. W tym kontekście przedstawiony przez Autora dobór metod i narzędzi do realizacji badań dotyczących: (i) identyfikacji obszarów o podobnym zachowaniu mechanicznym w ścianie brzucha człowieka oraz (ii) oceny potencjalnych dysfunkcji stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ) poprzez analizę sygnałów sEMG, uważam za słuszny i poprawny. Ponadto, zaprezentowane w rozprawie doktorskiej zadania badawcze wskazują na umiejętność poprawnego organizowania pracy naukowej oraz efektywnego korzystania z innowacyjnych/nowoczesnych narzędzi.

Moim zdaniem przyjęta hipoteza w pełni oddaje przedmiot rozprawy, której przewodnią tematyką jest analiza eksperymentalnie pozyskanych danych biomechanicznych z zastosowaniem nienadzorowanego modelu uczenia maszynowego, a mianowicie Map Samoorganizujących (SOM), który oferuje nowatorskie podejście do odkrywania ukrytych cech w zbiorach danych. Uważam, że można było w niej bardziej zaakcentować **dostarczenie nowej wiedzy i nowych informacji**. Świadczą o tym przyjęte cele:

(i) identyfikacja regionów o podobnym zachowaniu mechanicznym w ścianach brzucha u różnych osób, z wykorzystaniem pomiarów cyfrowej korelacji obrazu (DIC) w dynamicznych warunkach obciążenia,

(ii) ocena potencjalnej dysfunkcji stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ) poprzez analizę sygnałów elektromiografii powierzchniowej (sEMG) z mięśni otaczających staw, stanowiące zadania badawcze, a których realizacja przyniosła wyniki potwierdzające te założenia.

Doktorant przeprowadził szeroki przegląd literatury, właściwej dla przedmiotu rozprawy, i na jej podstawie zademonstrował potencjał rozwiązań opartych na uczeniu maszynowym, co pozwoliło mu na sformułowanie poprawnych założeń i przesłanek do zastosowania proponowanych narzędzi. Głównym zagadnieniem naukowym, które Doktorant rozpatruje jest identyfikacja podobieństw i wzorców w danych dotyczących ściany brzucha oraz stawu skroniowo-żuchwowego. W tym celu posłużył się danymi pochodzącymi z badań eksperymentalnych z użyciem cyfrowej korelacji obrazu (DIC) do analizy deformacji brzucha oraz sygnałami powierzchniowej elektromiografii (sEMG) do oceny funkcji mięśni stawu skroniowo-żuchwowego. Do integracji tych danych Doktorant w pracy wykorzystuje Mapy Samoorganizujące SOM, co niewątpliwie jest wyjątkowym i nowatorskim zastosowaniem/podejściem. Uważam, że realizacja prac badawczych stanowi samodzielny i oryginalny dorobek Autora, których wyniki uzupełniają aktualny stan wiedzy dotyczący identyfikacji podobieństw i wzorców specyficznych dla pacjenta i wspierania diagnostyki medycznej. Do istotnych i ważnych elementów rozprawy zaliczam:

- implementacja nienadzorowanego modelu uczenia maszynowego, jakim są Mapy Samoorganizujące (SOM), w analizie eksperymentalnie pozyskanych danych biomechanicznych, jako nowatorskie podejście do odkrywania ukrytych cech w zbiorach danych;
- identyfikacja regionów o podobnym zachowaniu mechanicznym w ścianie brzusznej oraz dynamicznych zmian kierunków odkształceń głównych; pokrywających się z cechami anatomicznymi, co ma potencjał w planowaniu operacji naprawy przepuklin i projektowaniu spersonalizowanych implantów.
- określenie spójnych, indywidualnych wzorców aktywności mięśniowej, co może wskazywać na potencjalne przedkliniczne lub subkliniczne dysfunkcje.

Przedstawione w rozprawie badania umożliwiły Doktorantowi zrealizowanie założonych celów naukowych oraz sformułowanie przekonujących spostrzeżeń i wniosków, które poparte uzyskanymi wynikami stanowią potwierdzenie przyjętej tezy. W rozprawie wskazano możliwość praktycznego zastosowania SOM do tworzenia narzędzi wspierających diagnostykę medyczną i zindywidualizowane procedury leczenia. Doktorant również zauważa potrzebę prowadzenia dalszych badań dla pełnego zrozumienia zaburzeń stawu skroniowo-żuchwowego (TMJ) oraz niewydolności ściany brzusznej proponuje zwiększenie próby badawczej i zakresu warunków eksperymentalnych. Również w kontekście udoskonalania narzędzi diagnostycznych Doktorant rozważa integrację SOM z innymi technikami, jak analiza głównych składowych (PCA) celem osiągnięcia wyższej dokładności, lepszej jakości klastrowania, a tym samym otrzymywania bardziej wiarygodnych wniosków.

4. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Praca zredagowana jest poprawnie w sposób zrozumiały z właściwą systematyką rozwiązywanych zagadnień. Jakość opracowania naukowego świadczy o dużej dojrzałości naukowej Autora, czego dowodem jest spójność zadań badawczych, ich realizacja i interpretacja wyników, a także opracowanie wniosków z wytyczeniem kierunku dalszych działań. Ponadto, przeprowadzone przez Doktoranta badania i uzyskane wyniki są potwierdzeniem słuszności przyjętej tezy.

Na podstawie wnikliwej analizy treści rozprawy zauważyłem, że praca zawiera pewne fragmenty wymagające dyskusji i wyjaśnienia ze względu na ujęte skróty myślowe lub zawarte ograniczenia, których nie uwzględniono w części opisowej poszczególnych rozdziałów. Przykładem jest relatywnie słabe uzasadnienie wyboru metody SOM - Mapy Samoorganizujące. Autor nie uzasadnia wprost, dlaczego metody nienadzorowane są odpowiedniejsze dla realizacji celów dysertacji, w przeciwieństwie do częściej cytowanych podejść nadzorowanych. Brakuje wyraźnego wyjaśnienia, dlaczego odkrywanie wzorców (nienadzorowane) jest bardziej właściwe niż przewidywanie (nadzorowane) w kontekście identyfikacji regionów o podobnym zachowaniu biomechanicznym.

Brakuje również szczegółowego uzasadnienia wyboru *odległości euklidesowej* dla poszczególnych typów danych biomechanicznych, takich jak odkształcenia czy sygnały sEMG. Głębsza dyskusja na ten temat, być może obejmująca analizę porównawczą z inną metryką, znacząco wzmocniłaby dokonany wybór i pewność co do uzyskanych klastrow. Ponieważ różne metryki odległości mierzą "podobieństwo" w różny sposób i mogą znacząco wpłynąć na wyniki klastrowania, zwłaszcza w przypadku wielowymiarowych, potencjalnie skorelowanych i nieliniowo powiązanych danych biomechanicznych.

Chociaż została zademonstrowana zdolność SOM do grupowania powtarzających się cech na małym zbiorze danych, zarówno dla badania ściany brzucha, jak i stawu skroniowo-żuchwowego, to zasadne byłoby rozszerzenie liczebności próby badawczej. Biorąc pod uwagę zmienność indywidualną danych biomechanicznych i różne warunki obciążenia oraz ograniczoną możliwość klasyfikacji potencjalnych problemów zdrowotnych to wymagane byłoby zgromadzenia większego zbioru danych od różnorodnych osób (zdrowych i z zaburzeniami). Ponadto, konieczne byłoby medyczne zwalidowanie wyników i ich interpretację. Współpraca z lekarzami pomogłaby w ocenie, czy zidentyfikowane wzorce klastrowania faktycznie korelują z diagnozami klinicznymi lub planowaniem leczenia pacjentów. Chociaż wskazano na korelacje z cechami anatomicznymi, dalsze badania na temat fizjologicznych i potencjalnych klinicznych przyczyn tych wzorców byłyby cenne.

Niezrozumiałe jest prezentowanie poprzez kolory żółty (yellow) i granatowy (navy) klastrow i ich wizualizowanie powierzchni ściany brzusznej pacjentów oraz na mapach klastrow. Doktorant powinien wyjaśnić czy kolor żółty zawsze odpowiada większym odkształceniom, a kolor granatowy mniejszym? Dlaczego mapy klastrow mają odmienne/przeciwnie kolory w analizie ϵ_1 dla wszystkich

kroków czasowych, a inne dla czterech kroków czasowych (patrz przykłady D1, D3, D4, D5, D6, D7, D12)? A dlaczego dla przypadków D11, D9, D8 są takie same?

Doktorant powinien również wyjaśnić przyjęty układ współrzędnych i jego lokalizację oraz orientację na powierzchni brzucha. Dokonuje obrazowego przedstawienia klastrów w tym układzie, ale nie podaje jednostek (miar) osi tego układu. Czy osie są opisane w jednostkach długości [mm], czy miarą bezwymiarowych odkształceń? Czy początek tego układu jest ulokowany w miejscu występowania pępka i jak są zorientowane odkształcenia ε_1 oraz ε_2 względem niego?

Rozprawa zawiera 94 rysunki, a biorąc pod uwagę objętość treści rozprawy (ok. 120 stron) uważam, że występuje zbyt duże przesycenie ilustracjami. Pomimo, że jest to uzasadnione dla analizy wyników SOM, to moim zadaniem duża część tych rysunków mogłaby stanowić załącznik do pracy. Zwłaszcza, że duża część rysunków jest słabej jakości ze względu na zbyt małą wielkość/rozmiar. Szczególnie dotyczy to rysunków od 5.65 do 5.75.

Prezentowane w pracy przez Autora wyniki analiz SOM danych dla pełnych ruchów zuchwy są bardzo interesujące. Jednakże, zauważalny jest brak symetrii map między lewą, a prawą stroną, zwłaszcza odnoszące się do aktywności mięśni (Masseter i Temporalis). Czy te różnice wynikają ze zbyt małej grupy badawczej, czy rzeczywiście ujawniają różnice będące wynikiem dysfunkcyjnej pracy mięśni jednej strony? Szkoda, że Autor nie dokonał porównania map obu stron osobno dla każdego przypadku, a nie zestawiając je razem dla wszystkich przypadków. Takie porównanie zapewne dawałoby istotne przesłanki do diagnozowania dysfunkcji u danego pacjenta.

Bibliografia obejmuje swoim zakresem artykuły prezentujące aktualną i nową wiedzę (*state of the art*) dotyczącą poruszanych zagadnień. Szkoda, że autor nie stosuje numeracji w spisie literatury, a także nie podaje numerów DOI. Zauważyłem, że również występuje w nim powtórzenie publikacji Gao i inni (2023).

W pracy zauważalne są też stosowane przez Autora skróty myślowe, które czasami są nieco mylące lub nieprecyzyjne, co może powodować błędne ich rozumowanie. Przykładem jest zdanie: *"First 30% of the motion following next 40% and ending with another 30% of motion"* (str. 102). Wskazuje i sugeruje ono sekwencję oddzielnych etapów ruchu, zamiast opisywać podział jednego, ciągłego ruchu na fazy tak, jak to wyjaśnia podpis rysunku 6.2. Te fazy to:

- faza przyspieszenia: 0–30% ruchu,
- faza środkowa: 30–70% ruchu,
- faza zwalniania: 70–100% ruchu.

W pracy występują również pewne błędy natury redakcyjnej (edytorskiej), do których można zaliczyć m. in.:

- liczne „wdowy” i „sieroty” tj. pozostawienie na końcu akapitu krótkiego, zazwyczaj jednowyrazowego wiersza czy pojedynczych liter na ostatnim miejscu w wersie;
- wielokrotne występowanie dużych odstępów w treści rozprawy, a także licznych pustych całych stron;
- prezentowanie w małych rozmiarach większości rysunków, a także wykresów, zwłaszcza przedstawiających wyniki w podobnych kolorach (np. rys. 6.2.), co utrudnia odczyt opisów oraz legend i ich interpretację,
- stosowanie odsyłaczy do rysunków, które występują w treści poza sekcją do ich odwołania.

Pozostałe drobne uwagi i błędy redakcyjne zostały zaznaczone w tekście pracy i przekazane Autorowi.

5. Ocena końcowa

Podsumowując, uważam, że Pan mgr inż. Mateusz Troka w sposób oryginalny analizuje dane biomechaniczne stosując Mapy Samoorganizujące (SOM) do identyfikacji regionów o podobnym zachowaniu mechanicznym ludzkiej ściany brzusznej oraz oceny dysfunkcji stawu skroniowo-

żuchwowego (TMJ) na podstawie sygnałów sEMG. Świadczy to o dobrej wiedzy Doktoranta w szerokim zakresie m.in. dotyczącej nowoczesnych metod badawczych oraz obliczeniowych stosowanych w inżynierii mechanicznej. Pragnę zaakcentować szeroki zakres zrealizowanych analiz metodami uczenia maszynowego, dostarczających nowej wiedzy, którą Doktorant efektywnie wykorzystał opracowując podstawy do tworzenia narzędzi wspierających diagnostykę medyczną, które mogą mieć praktyczne zastosowanie i być wykorzystywane przy planowaniu zindywidualizowanych procedur leczenia.

Reasumując stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Mateusza Troki spełnia warunki określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o Szkolnictwie Wyższym i Nauce (Dz.U. 2020r. poz.85) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Gdańskiej o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny pracy i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z użyciem nowoczesnych metod oraz zastosowanie wyników badań do sfery społecznej, a także zwracając uwagę na samą sylwetkę Doktoranta w aktywności naukowej, czego przykładem są cztery Autorskie publikacje, które stanowią część rozprawy doktorskiej wnioskuję o jej wyróżnienie.

Wojciech Woźniak