

Streszczenie

Głównym celem naukowym podjętych badań było opracowanie metodyki i zweryfikowanie możliwości jej zastosowania do wyznaczenia charakterystyk zmęczenia mięśni kończyn dolnych w ruchu dynamicznym. Motywacją do podjęcia tematu dysertacji była ograniczona liczba prac naukowych dotyczących niniejszej tematyki, która w przeważającej mierze koncentruje się na analizie zmęczenia w warunkach statycznych. W przeciwieństwie do warunków statycznych, cykliczny wysiłek fizyczny determinuje szereg czynników dynamicznych, obejmujących ciągłe wahania zmiennych kinematycznych i kinetycznych. Te uwarunkowania mechaniczne wprowadzają istotne wyzwania pomiarowe, takie jak wysoka niestacjonarność rejestrowanego sygnału sEMG, zaburzenia wynikające z przesunięcia elektrod względem pracującego mięśnia oraz powstawanie licznych artefaktów ruchowych, co znacząco ogranicza efektywność zastosowania tradycyjnych metod analizy częstotliwościowej.

W ramach realizacji celów cząstkowych przeprowadzono wieloetapowe eksperymenty. W fazie wstępnej zintegrowano sensory mechatroniczne elektromiografii powierzchniowej (sEMG) oraz spektroskopii bliskiej podczerwieni (fNIRS) w celu monitorowania aktywności mięśniowej i utlenowania tkanek podczas biegu na bieżni oraz ćwiczeń na platformie step. Doświadczenia te pozwoliły na opracowanie metodyki pomiarowej i obliczeniowej, co doprowadziło do decyzji o wykorzystaniu ergometru wioślarskiego do realizacji badań głównych. Ergometr wioślarski zapewnia wysoką powtarzalność ruchu cyklicznego podczas ćwiczeń, co jest krytyczne dla standaryzacji pomiarów dla określonej grupy sportowców.

Kluczowym osiągnięciem pracy jest autorski algorytm obliczeniowy, dzięki któremu dokonywana jest segmentacja sygnału EMG rejestrowanego podczas ćwiczeń na ergometrze wioślarskim na podstawie zmian kąta zgięcia kończyny dolnej w kolanie, monitorowanego przy użyciu markerów. Każdy cykl ruchu poddawany był dekompozycji z wykorzystaniem dyskretnej transformaty falkowej (DWT). Wybór falki macierzystej Daubechies 4 (db4) podyktowany był jej charakterystyką czasowo-częstotliwościową, która odzwierciedla naturę sygnałów sEMG w warunkach dynamicznych. Pozwoliło to na wyznaczenie rozkładu mediany częstotliwości (MDF) i obliczenie współczynnika nachylenia prostej regresji liniowej, stanowiącego obiektywny, ilościowy wskaźnik zmęczenia mięśniowego.

Badania główne charakterystyk zmęczenia mięśni kończyn dolnych w ruchu dynamicznym objęły grupę 8 zawodników sekcji wioślarskiej AZS WAT. Testy zrealizowano

w dwóch wariantach: klasycznym oraz z implementacją immersyjnego środowiska wirtualnej rzeczywistości (VR), opracowanego na potrzeby dysertacji w silniku Unreal Engine 5. Środowisko VR symulowało realistyczny spływ rzeką w terenie zalesionym, dostarczając uczestnikom dodatkowych bodźców wzrokowych i akustycznych. Analiza statystyczna wykazała, że choć sceneria VR wpływa na subiektywne odczucia i emocje, nie modyfikuje ona w sposób istotny statystycznie fizjologicznego narastania zmęczenia mierzonego parametrem MDF ($p > 0.05$).

Dodatkowo w ramach przeprowadzonych badań zweryfikowano wpływ siły mięśniowej uczestników oraz ich dotychczasowych osiągnięć sportowych na wskaźniki zmęczenia. Wykazano, że opracowana metoda jest niezależna od bezwzględnej siły generowanej przez zawodników, co świadczy o jej wysokiej obiektywności i przydatności w monitorowaniu procesu zmęczenia niezależnie od predyspozycji siłowych. Praca kończy się na wskazaniu kierunków dalszych badań, takich jak integracja sygnałów fNIRS z mózgu w środowisku VR oraz zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji do predykcji momentu wystąpienia zmęczenia krytycznego.