

Rezultaty projektu badawczego o numerze 2016/23/B/NZ7/03310 pt. **Wykorzystanie mechatronicznych kijów Nordic Walking w modelowaniu i ocenie rehabilitacji wybranych grup chorych** finansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki

**1. Do najważniejszych osiągnięć projektu należy zaliczyć;**

- Opracowanie wzorców chodu swobodnego (bez kijów do Nordic Walking), z klasycznymi kijami do Nordic Walking (NW) i kijami mechatronicznymi w grupie osób profesjonalnie zajmujących się tym rodzajem chodu (trenerzy, instruktorzy i zawodnicy), osób młodych bez doświadczenia w chodzie z kijami NW, osób w starszym wieku oraz chorych na choroby układu krążeniowo-naczyniowego oraz wykazanie różnic między tymi rodzajami chodu.
- Wyselekcjonowanie w oparciu o wyznaczone wzorce chodu istotnych parametrów kinematycznych i dynamicznych ruchów kończyn dolnych i kijów NW pozwalające na monitorowanie i ocenę poprawności marszu NW.
- Opracowanie i wykonanie stanowiska badawczego do symulacji ruchów w płaszczyźnie strzałkowej wykonywanych przez kończyny górną i dolną człowieka podczas marszu bez kijów, oraz z kijami NW.
- Opracowanie i wykonanie mechatronicznego systemu kijów NW (zbudowanego z klasycznych kijów wyposażonych w czujniki elektroniczne, pomiarowe wkładki do butów, komputera sterującego i urządzenia mobilnego (tabletu)) pozwalającego na monitorowanie, akwizycję i analizę biomechaniczną wybranych parametrów chodu NW.
- Opracowanie programu na urządzenie mobilne (tablet) pozwalające w sposób bezprzewodowy na wizualizację i analizy w czasie rzeczywistym pozyskanych z systemu kijów NW parametrów chodu.
- Opracowanie w komputerowym systemie do analizy układów wielocłonowych dynamicznego numerycznego modelu biomechanicznego człowieka w oparciu o pozyskane pomiary rzeczywiste człowieka podczas chodu zwykłego i z kijami NW.
- Przeprowadzenie badań symulacyjnych w celu wyznaczenia obciążeń w wybranych stawach człowieka podczas marszu z kijami NW i bez nich.
- Wykazanie, że dodatkowe czujniki elektroniczne zamocowane na klasycznych kijach do Nordic Walking nie zmieniały techniki chodu NW, co umożliwia wykorzystanie ich do analizy biomechanicznej.
- Wykazanie nieprawidłowości we wzorcach chodu z kijami NW w grupie osób w starszym wieku i osób chorych na choroby układu krążeniowo-naczyniowego.
- Potwierdzenie wysokiej skuteczności treningu NW u chorych na choroby układu krążeniowo-naczyniowego.
- Wykazanie braku związku skuteczności rehabilitacji kardiologicznej mierzonej zwiększeniem zdolności wysiłkowej ze zmianą biomechaniki chodu.

**2. Krótki opis uzyskanych efektów**

Opracowano i wykonano prototyp mechatronicznego systemu kijów NW, którego elementami składowymi są: 2 standardowe kije NW wyposażone w dziewięćosiove czujniki inercyjne (trójosiowy żyroskop, akcelerometr i magnetometr), czujniki mierzące siłę nacisku wzdłuż kija na podłoże, czujniki kontaktowe na rękojeści, czujniki mierzące odległości przejścia kija od kończyny dolnej, 2 wkładki do butów (każda wyposażona w 3 czujniki) mierzące rozkład siły nacisku stóp na podłoże oraz układ sterujący zbudowany z 4 mikrokontrolerów oraz z komputera nadzorującego i zbierającego dane. Dodatkowo system kijów NW jest wyposażony w urządzenie mobilne (tablet) z

opracowanym programem dedykowanym do wizualizacji i analiz on-line/off-line mierzonych parametrów podczas marszu (rys. 1).

W celu sprawdzenia poprawności i powtarzalności działania opracowanych algorytmów pomiarowych mechatronicznego systemu kijów NW zbudowano stanowisko do symulacji ruchów kończyn człowieka w płaszczyźnie strzałkowej podczas marszu z kijami NW. Struktura oraz działanie stanowiska miały na celu odzwierciedlenie uzyskanych z pomiarów rzeczywistych ruchów kończyn i kija NW (rys. 2). Zbudowane stanowisko pozwoliło na cykliczne odtwarzanie zmierzonych ruchów dla potrzeb projektowania i walidacji układu pomiarowego mechatronicznego systemu kijów NW. Odczyt danych i zadawanie parametrów ruchu odbywało się za pośrednictwem komputera wyposażonego w dedykowane układy kontrolno-pomiarowe.

Do weryfikacji działania opracowanych pomiarowych wkładek do butów pozwalających na identyfikację faz chodu wykorzystano zakupioną aparaturę (system (Tekscan F- Scan In-Shoe) do pomiaru nacisku stóp na podłoże. Badania polegały na jednoczesnym pomiarze nacisków stóp na podłoże podczas marszu NW przez opracowane wkładki i system Tekscan (w każdym bucie umieszczano dwie wkładki pomiarowe). Badania wykazały, że opracowane wkładki poprawnie identyfikują fazy chodu i mogą być wykorzystane przy ocenie poprawności marszu NW.

Przeprowadzone testy sygnałów z czujników mechatronicznego systemu kijów NW wykazały wystarczającą dokładność pomiarową, wymaganą podczas badania poprawności chodu NW. Opracowany system pomiarowy może być stosowany w warunkach laboratoryjnych, ale także w warunkach rzeczywistych podczas ćwiczeń. Na podstawie opracowanej dokumentacji i prototypu mechatronicznego systemu kijów NW wykonano 5 egzemplarzy systemu.



Rys. 1. Schemat funkcjonalny, widok systemu mechatronicznych kijów NW, widok amatorki podczas chodu oraz okno aplikacji mobilnej z wizualizacją on-line parametrów marszu NW



Rys. 3. Etapy budowy modelu biomechaniki człowieka podczas chodu z kijami NW i bez nich w komputerowym systemie do dynamicznej analizy układów wieloczłonowych

Opracowany system pomiarowy zastosowano w badaniach chodu profesjonalistów (trenerów, instruktorów, zawodników NW), studentów, osób w starszym wieku i chorych na choroby układu krążeniowo-naczyniowego porównując go z chodem swobodnym (bez kijów) i chodem z klasycznymi kijami do NW.

W przypadku profesjonalistów wykazano, że chód z klasycznymi jak i mechatronicznymi kijami NW zwiększał udział kończyn górnych i dolnych powodując wzrost siły napędowej chodu, przy jednoczesnym zwiększeniu jego bezpieczeństwa (rys. 4).. Jednocześnie stwierdzono, że osoby o najwyższej technice chodu NW wykorzystywały wzorce tego chodu podczas chodu swobodnego. Potwierdzono również, że wyposażenie klasycznych kijów w czujniki elektroniczne nie zmieniało techniki chodu, co pozwala na wiarygodne pomiary kinematyki i dynamiki chodu



Rys. 4. Widok chodu profesjonalisty z systemem mechatronicznych kijów NW

W przypadku badań studentów wykazano istotne różnice zarówno parametrów kątowych jak i czasowo-przestrzennych chodu swobodnego, z kijami klasycznymi i mechatronicznymi między kobietami mężczyznami. Najwięcej różnic stwierdzono w chodzie z kijami klasycznymi i mechatronicznymi, najmniej w

chodzie bez kijów. Wyniki tych badań jednoznacznie wskazują na konieczność osobnej analizy chodu NW kobiet i mężczyzn.

Osoby w starszym wieku odwrotnie niż profesjonalści stosowały wzorce chodu swobodnego podczas chodu z kijami NW, co wskazywało na niewykorzystanie możliwości tego rodzaju chodu. W badaniach tych osób nie stwierdzono większego zaangażowania kończyn górnych i dolnych w chodzie NW w porównaniu z chodem swobodnym, co nie zwiększało siły napędowej chodu. Mogło to świadczyć także o tym, że kije zakłócały sterowanie ruchem ograniczając zakres ruchów w stawach kończyn. Kije nie tylko nie wspomagały odpowiednich faz chodu, ale w pewnym stopniu nawet utrudniały ich wykonanie. Może to mieć istotne znaczenie dla bezpieczeństwa chodu NW, dlatego na etapie nauki chodu NW, zwłaszcza osób w starszym wieku i z obniżoną sprawnością fizyczną należy zachować szczególną ostrożność. W tej grupie badanych nie wykazano różnic wzorca chodu z kijami klasycznymi i mechatronicznymi, co pozwala na zastosowanie tych ostatnich do wiarygodnych pomiarów. Ma to istotne znaczenie, gdyż w tej grupie wiekowej takie pomiary ze zwrotną informacją o prawidłowości wzorca chodu są szczególnie ważne dla opanowania prawidłowej techniki chodu NW i jego bezpieczeństwa. Chód z kijami NW chorych na chorobę niedokrwienną serca zwiększał udział fazy wymachu i długość kroku, przy skróceniu kadencji bez zmiany fazy pojedynczego i podwójnego podporu oraz prędkości chodu. Stwierdzono także większe zakresy ruchów w stawach kończyn dolnych w płaszczyźnie czołowej i poprzecznej, które mogły być przejawem nieprawidłowego wzorca tego chodu. Bardzo charakterystyczną cechą wzorca chodu tych chorych była asymetria między prawą i lewą stroną ciała, która mogła wynikać z podświadomej ochrony lewej jej

połowy. Jednym z objawów choroby niedokrwiennej serca jest ból, zwłaszcza lewej połowy klatki piersiowej, który nasila się podczas wysiłku fizycznego. Może wytworzyć to odruchową, przeciwbólową reakcję polegającą na mniejszym zaangażowaniu lewej kończyny górnej i dolnej podczas chodu, które utrwalając się może stać się nawykiem i być przyczyną asymetrycznego wzorca chodu z kijami zwiększającymi zaangażowanie kończyn, a więc i potencjalny ból. Taki asymetryczny wzorzec chodu wymaga korekty, zarówno na etapie nauki chodu jaki podczas treningu, bowiem może zmniejszać efektywność rehabilitacji i być przyczyną zmian przeciążeniowych układu ruchu. Natomiast podobnie jak w poprzednich badaniach potwierdzono, że kije mechatroniczne mogą być wiarygodnym źródłem informacji o biomechanice chodu, bowiem nie stwierdzono różnic między chodem z tymi kijami i klasycznymi kijami NW.

Najważniejszym celem projektu była ocena związków zmian fizjologicznych ze zmianami biomechaniki chodu w badanych grupach chorych na chorobę niedokrwinną serca. Założono bowiem, że poprawa tolerancji wysiłkowej tych chorych będzie istotnie związana ze wzrostem sprawności chodu. W wyniku 6-tygodniowego treningu chodu NW (18 sesji treningowych) stwierdzono istotne zwiększenie zdolności wysiłkowych mierzonych zarówno w elektrokardiograficznej próbie wysiłkowej jak i w teście 6-minutowego marszu, które nie wykazywały jednak związku ze zmianami parametrów kątowych i czasowo-przestrzennych chodu, mimo zmian tych parametrów w wyniku treningu, które można uznać za zwiększenie sprawności chodu. Dotyczyło to między innymi zwiększenie kąta zgięcia w stawie skokowymi i biodrowym oraz w stawie ramiennym, jak również skrócenie fazy podwójnego podporu z wydłużeniem fazy wymachu i pojedynczego podporu, które niewątpliwie należy uznać za przejawy zwiększenia sprawności chodu. Jednak poprawa sprawności chodu była z reguły bez związku ze zwiększeniem zdolności wysiłkowej chorych na chorobę niedokrwinną serca. Jednak niektóre parametry fizjologiczne i biomechaniczne chodu wykazywały istotny związek, gdyż stwierdzono korelację wydłużenia czasu testu wysiłkowego ze zwiększeniem kąta zgięcia w stawie biodrowym, stawie ramiennym i skokowym, co można uznać za wynik wymagający wyjaśnienia w trakcie dalszych badań. Natomiast nie potwierdzono różnic uzyskanych wyników zależnie od rodzaju kijów. Wynika z tego, że technika chodu i jego sprawność nie miały wpływu na wyniki rehabilitacji chorych na chorobę niedokrwinną serca. W związku z tym nie potwierdzona została hipoteza o związku sprawności chodu ze skutecznością rehabilitacji kardiologicznej.

### **3. Aktualny i oczekiwany wpływ projektu na rozwój dyscypliny naukowej oraz rozwój innych dyscyplin**

Niewątpliwie badania prowadzone w projekcie były jednymi z nielicznych dotyczących opracowania projektu i konstrukcji kijów do Nordic Walking wyposażonych w system czujników mierzących i analizujących kątowe i czasowo-przestrzenne parametry chodu. W tym zakresie ich wyniki mogą mieć wpływ na rozwój nauk technicznych, a zwłaszcza mechatroniki i inżynierii biomedycznej. W systemie stworzonym na potrzeby projektu zastosowano łączność przewodową, którą uznano za pewniejszą, bowiem przesyłany sygnał ulegał mniejszym zakłóceniom. Jednak pewnym problemem były łączenia przewodów, które były słabszym punktem systemu przy intensywnym korzystaniu z kijów. W przyszłości należałoby zastosować bezprzewodowe systemy przesyłania sygnałów, które zdecydowanie poprawiłyby

funkcjonalność kijów mechatronicznych. Byłby to impuls dla nauk technicznych do dalszych poszukiwań i udoskonalania tych kijów.

Badania wykonane w projekcie stanowią także ważny wkład w rozwój nauk o kulturze fizycznej, zwłaszcza w zakresie biomechaniki ruchu człowieka. Zostały bowiem opracowane wzorce chodu Nordic Walking z kijami mechatronicznymi i porównane z chodem bez kijów (swobodnym) i z kijami klasycznymi. W dostępnym piśmiennictwie nie znaleziono podobnych badań, które otwierają nowe możliwości i wytyczają dalsze kierunki dla biomechaniki chodu. Tym bardziej, że w badaniach prowadzonych w tym projekcie nie uwzględniono jeszcze wielu zmiennych niezależnych, które mogły mieć wpływ na uzyskane wyniki. Badania większych grup z uwzględnieniem tych zmiennych pozwoliłoby na jeszcze dokładniejsze opracowanie wzorców chodu Nordic Walking. Wyniki te mogłyby zostać wykorzystane w nauce i treningu chodu Nordic Walking, zarówno w sporcie, rekreacji jak i rehabilitacji. Pozwoliłoby to na dalsze badania wpływu kijów mechatronicznych na technikę i bezpieczeństwo chodu Nordic Walking.

I wreszcie badania prowadzone w projekcie mogą być implikacją dla nauk medycznych i nauk o zdrowiu, zwłaszcza w zakresie rehabilitacji. Uzyskanie w trybie rzeczywistym informacji o wzorcu chodu pozwoliłoby na korektę stwierdzonych nieprawidłowości, co mogłoby mieć istotny wpływ na skuteczność rehabilitacji. Chód Nordic Walking jest powszechnie stosowaną formą treningu/aktywności fizycznej we wszystkich specjalnościach rehabilitacji. Jednak brak jest badań, które oceniałyby związek wyników rehabilitacji z oceną kinematyczną i kinetyczną tego chodu. Założeniem projektu było między innymi poszukiwanie takich związków, które powodowałyby, że poprawa wzorca chodu byłaby związana z większą skutecznością rehabilitacji. Pierwsze badania w tym zakresie były wykonane w tym projekcie, ale wymagają one kontynuacji w większej liczbie chorych, w różnych specjalnościach oraz z obserwacjami odległymi. I to byłby oczekiwany wpływ na rozwój nauk medycznych i nauk o zdrowiu, który pozwoliłby również na modyfikację programów rehabilitacyjnych wykorzystujących chód i uwzględnienie w ich opracowaniu nie tylko parametrów fizjologicznych, ale także biomechanicznych, które obecnie wykorzystywane są w minimalnym stopniu.

#### **4. Publikacje**

J. Bałchanowski, A. Muraszkowski, J. Szrek, S. Wudarczyk, B. Lewandowski, S. Mróz, R. Jasiński, T. Niebudek, B. Pietraszewski, M. Woźniewski Opracowanie metodyki badań chodu Nordic Walking z mechatronicznymi kijami w rehabilitacji wybranych schorzeń. *Interdisciplinary Journal of Engineering Sciences*, 2018, 1, 54 – 60

A. Muraszkowski, J. Szrek, S. Wudarczyk, J. Bałchanowski, R. Jasiński, B. Pietraszewski, M. Woźniewski Integration of Motion Capture Data Acquisition with Multibody Dynamic Simulation Software for Nordic Walking Gait Analysis. *Proceedings of the 14th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering. CAE 2018, Springer Nature Switzerland AG 2019*, 978-3-030-04974-4, 2019, 510-517

J. Szrek, A. Muraszkowski, J. Bałchanowski, S. Wudarczyk<sup>1</sup>, R. Jasiński, T. Niebudek, M. Woźniewski Force Measurement Module for Mechatronic Nordic Walking Poles. *Proceedings of*

the 14th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering. CAE 2018. Springer Nature Switzerland AG 2019, 978-3-030-04974-4, 2019, 790-794

J. Szrek, S. Wudarczyk, J. Bałchanowski, B. Lewandowski, S. Mróz, R. Jasiński, M. Woźniewski Research on the mechatronic gait monitoring system with Nordic Walking poles. Proc. 15th International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM2020), 2020, 1- 6

J. Szrek, S. Wudarczyk, J. Bałchanowski, B. Lewandowski, S. Mróz, R. Jasiński, M. Woźniewski Experimental research of the mechatronic Nordic Walking poles, Proc. 15th International Conference Mechatronic Systems and Materials (MSM2020), 2020, 1- 6

S. Wudarczyk, B. Lewandowski, J. Szrek, J. Bałchanowski A simulation stand for human limb movements during nordic walking. Proceedings of TMM 2020 - Mechanisms and Machine Science, Springer, 2021, 173-182

A. Bartoszek, A. Struzik, S. Jaroszczuk, M. Woźniewski, B. Pietraszewski Comparison of the optoelectronic BTS Smart system and IMU-based MyoMotion system for the assessment of gait variables. Acta of Bioengineering and Biomechanics, 2022, 24, 1, 103 - 115

A. Szpala, M.Kołodziej, A.Struzik, R.d Jasiński, K. J. Bałchanowski, B. Pietraszewski and M. Woźniewski, Selected spatiotemporal and joint angle parameters in normal gait and Nordic walking with classical and mechatronic poles in aspects of sex difference. Journal BioMed Research International, 2022, 1-9

J. Bałchanowski, S. Wudarczyk, R. Jasiński, M. Woźniewski Mechatroniczny system identyfikacji faz chodu z kijami Nordic Walking. Computer Aided Engineering. Nauka i Przemysł. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2022, 15-23

A. Szpala, S. Winiarski, M. Kołodziej, B. Pietraszewski, R. Jasiński, T. Niebudek, A. Lejczak, K. Lorek, K. Bałchanowski, S. Wudarczyk, M. Woźniewski No influence of mechatronic poles on the movement pattern of professional Nordic Walkers. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20, 1-11