

AUTOREFERAT

kandydata do stopnia doktora habilitowanego

dr Dawid Łochyński

1. DANE OSOBOWE

Imię i nazwisko: Dawid Łochyński

Data i miejsce urodzenia: 10.04.1977 r., Poznań

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE

Wykształcenie: magister fizjoterapii, Wydział Wychowania Fizycznego, Akademia Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu (13 czerwiec 2002 r.)

Stopień naukowy: doktor nauk o kulturze fizycznej nadany uchwałą Rady Wydziału Wychowania Fizycznego Akademii Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu (27 czerwiec 2006 r.)

Tytuł rozprawy doktorskiej: Wpływ starzenia się organizmu na regulację siły skurczu jednostek ruchowych w modelu zwierzęcym

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. Piotr Krutki (Zakład Neurobiologii, AWF Poznań)

Recenzenci rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. Anna Jaskólska (Katedra Kinezyjologii, AWF Wrocław), prof. dr hab. Wiesław Osiński (Zakład Teorii Wychowania Fizycznego i Antropomotoryki, AWF Poznań)

3. INFORMACJE O DOTYCHCZSOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTAKCH NAUKOWYCH

Miejsce pracy: Akademia Wychowania Fizycznego im. Eugeniusza Piaseckiego w Poznaniu

Obecnie zajmowane stanowisko: adiunkt; Zakład Rehabilitacji Narządu Ruchu

Dotychczasowe zatrudnienie:

10.2002 – 06.2006 r. uczestnik studiów doktoranckich; Zakład Neurobiologii, Akademia Wychowania Fizycznego w Poznaniu

10.2006 – 10.2010 r. adiunkt; Zakład Kinezyterapii, Akademia Wychowania Fizycznego w Poznaniu

4. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY HABILITACYJNEJ

4.1. TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

„Zmiany adaptacyjne w rozwoju i regulacji siły skurczu jednostek ruchowych”

4.2. WYKAZ PUBLIKACJI NAUKOWYCH STANOWIĄCYCH OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE HABILITANTA

1. **Łochyński D.**, Celichowski J., Korman P., Raglewska P. (2007) Changes of motor unit contractile output during repeated activity. Acta Neurobiologiae Experimentalis 67: 23-33. IF 0,940, MNiSW – 10

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i projektu pracy 40%, zaplanowaniu doświadczeń 50%, udziale w gromadzeniu danych i realizacji badania 50%, analizie i interpretacji danych 50%, opracowaniu wstępnej wersji manuskryptu 85%, przygotowaniu rycin 100%, doborze piśmiennictwa i korekcie opracowania 60%. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

2. **Łochyński D.**, Kaczmarek D., Krutki P., Celichowski J. 2010, Effect of ageing on the force development in tetanic contractions of motor units in rat medial gastrocnemius muscle. Mechanisms of Ageing and Development 131: 545-553. IF - 4.857, MNiSW – 32

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i projektu pracy 50%, zaplanowaniu doświadczeń polegających na chirurgicznej i funkcjonalnej izolacji oraz rejestracji aktywności wywołanej jednostek ruchowych 50%, udziale w gromadzeniu danych i realizacji badania 50%, analizie i interpretacji danych 50%, opracowaniu wstępnej wersji manuskryptu 90%, przygotowaniu rycin 80%, doborze piśmiennictwa i korekcie opracowania 50%. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

3. **Łochyński D.**, Bączyk M., Kaczmarek D., Rędownicz M.J., Celichowski J., Krutki P. 2013. Adaptations in physiological properties of rat motor units following 5 weeks of whole-body vibration. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism 38(9): 913-921. IF - 2.131, MNiSW – 30

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i projektu pracy 50%, aplikacji treningu wibracji całego ciała przez 1 miesiąc 50%, zaplanowaniu doświadczeń polegających na chirurgicznej i funkcjonalnej izolacji oraz rejestracji aktywności wywołanej jednostek ruchowych 40%, udziale w gromadzeniu danych i realizacji badania 50%, analizie i interpretacji danych 50%, opracowaniu wstępnej wersji manuskryptu 90%, przygotowaniu rycin 80%, doborze piśmiennictwa i korekcie opracowania 50%. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

4. **Łochyński D.**, Kaczmarek D., Rędownicz M.J., Celichowski J., Krutki P. 2013. Long-term effects of whole-body vibration on motor unit contractile function and myosin heavy chain composition in the rat medial gastrocnemius. *Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions* 13(4): 430-41. IF - 2.450, MNiSW – 25

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i projektu pracy 50%, aplikacji treningu wibracji całego ciała przez 6 miesięcy 50%, zaplanowaniu doświadczeń polegających na chirurgicznej i funkcjonalnej izolacji oraz rejestracji aktywności wywołanej jednostek ruchowych 40%, udziale w gromadzeniu danych i realizacji badania 50%, analizie i interpretacji danych 50%, opracowaniu wstępnej wersji manuskryptu 90%, przygotowaniu rycin 80%, doborze piśmiennictwa i korekcie opracowania 50%. Mój udział procentowy szacuję na 50%.

Sumaryczny Impact Factor dla cyklu publikacji: 10,378

Sumaryczna punktacja MNiSW dla cyklu publikacji: 97

4.3. OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW WRAZ Z UZASADNIENIEM, CO ONE WNOSZĄ DO ROZWOJU DZIEDZINY NAUK O ZDROWIU

Siła skurczu mięśni poprzecznie prążkowanych rozwijana jest dzięki pracy jednostek ruchowych, które są najmniejszymi elementami czynnościowymi układu nerwowo-mięśniowego. U ludzi i innych ssaków jednostki ruchowe zbudowane są z neuronu ruchowego tzw. α -motoneuronu, którego ciało mieści się w rogach brzusznych rdzenia kręgowego, oraz unerwianych przez jego akson włókien mięśniowych zlokalizowanych w obrębie mięśnia. Motoneurony jednostek ruchowych zwykle charakteryzuje się na podstawie morfologii (wielkości), pobudliwości i dystrybucji wpływów synaptycznych. W oparciu o wymienione cechy wyróżnia się neurony małe, wolne o wysokiej pobudliwości oraz duże, szybkie o niskiej pobudliwości. Natomiast jednostki ruchowe klasyfikuje się na podstawie cech skurczu wchodzących w ich skład włókien mięśniowych na trzy typy: (1) wolno kurczące się, odporne na zmęczenie (ang. *slow*, S) o niskiej sile skurczu, zbudowane z włókien mięśniowych wolnych, tlenowych (ang. *slow, oxidative*, SO); (2) szybko kurczące się odporne na zmęczenie (ang. *fast resistant to fatigue*, FR) o pośredniej sile skurczu, zbudowane z włókien mięśniowych szybkich tlenowo-glikolitycznych (ang. *fast, oxidative-glycolytic*, FOG); oraz (3) szybko kurczące się nieodporne na zmęczenie (ang. *fast fatigable*, FF) o wysokiej sile skurczu, zbudowane z włókien szybkich, glikolitycznych (ang. *fast, glycolytic*, FG). Ten czynnościowy podział jednostek ruchowych dokonuje się przy użyciu metod elektrofizjologicznych (elektrycznej stymulacji) na podstawie czasu skurczu pojedynczego (w

odpowiedzi na pojedynczy bodziec), występowania lub braku objawu ugięcia w skurczach tężcowych niezupełnych (w odpowiedzi na ciąg bodźców o częstotliwości 40 Hz) oraz wartości wskaźnika zmęczenia ilustrującego zmiany siły po 2 minutach aktywacji – skurczach tężcowych powtarzanych co 1 sekundę.

Włókna mięśniowe jednostek ruchowych są sterowane przez wyspecjalizowane komórki nerwowe mieszczące się w pniu mózgu i rdzeniu kręgowym zwane neuronami ruchowymi. Te neurony przekazują sygnały z mózgu do mięśni doprowadzając do realizacji funkcji ruchowej, takich jak oddychanie, sięganie, chwytanie, chodzenie i utrzymywanie postawy. Niestety, choroby neuronu ruchowego lub przerwania rdzenia kręgowego mogą uszkodzić motoneurony powodując paraliż mięśni i trwałą utratę funkcji. Obecnie trwają prace zmierzające do opracowania metod leczenia pacjentów z chorobami neuronu ruchowego, u których mięśnie szkieletowe stają się stopniowo sparaliżowane, co ostatecznie prowadzi do utraty zdolności funkcjonalnych. Jedną z potencjalnie obiecujących, obecnie testowanych technik jest transplantacja specjalnie zaprojektowanych neuronów ruchowych utworzonych z komórek macierzystych do gałęzi nerwów rdzeniowych, w celu zastąpienia uszkodzonych neuronów. Te neurony ruchowe mogą reinerwować osieroczone włókna nerwowe i reagować na impulsy światła niebieskiego. Dzięki temu możliwe jest dostrojenie siły skurczu jednostek ruchowych przez dostosowanie intensywności, czasu trwania i częstotliwości impulsów świetlnych, w oparciu o ogólnie znane mechanizmy kontrolujące siłę jednostek ruchowych za pomocą wyładowań impulsów nerwowych. Ostatecznie, potencjalną korzyścią z zastosowania metody stymulacji świetlnej jest stworzenie swego rodzaju optycznych rozruszników umożliwiających przywrócenie lub rozwój różnych funkcji ruchowych. Na przykład jednym z podstawowych wyzwań współczesnej medycyny jest utrzymanie funkcji oddychania u pacjentów, u których neurony zawiadujące przeponą zostały uszkodzone. Biorąc pod uwagę te idee, główną motywacją badań prowadzonych w trakcie mojej dotychczasowej działalności naukowej było dokładniejsze zrozumienie wzajemnych powiązań pomiędzy wzorcem i częstotliwością wyładowań potencjałów czynnościowych generowanych przez motoneurony a rozwojem siły skurczu jednostek ruchowych u osobników zdrowych. Ponadto interesującym aspektem prowadzonych badań było poznanie zmian adaptacyjnych zachodzących w regulacji siły skurczu i parametrach skurczu jednostek ruchowych pod wpływem starzenia się i wskutek wibracji całego ciała.

U ludzi niezwykle trudno jest zmierzyć parametry mechaniczne sklasyfikowanych fizjologicznie jednostek ruchowych i precyzyjnie scharakteryzować zmiany w rozwoju siły skurczu jednostek podczas skurczów wywołanych. W zamian tego rejestrowana jest, przy użyciu elektromiografii igłowej, czynność pojedynczych jednostek ruchowych - wzorzec i częstotliwość wyładowań najbardziej pobudliwych motoneuronów - podczas skurczów dowolnych mięśni. Na tej podstawie próbuje się wyekstrahować z zapisów skurczu wielu

jednostek ruchowych aktywność skurczową pojedynczej jednostki przy użyciu techniki 'spike-triggered averaging'. Jest to jednak mało precyzyjna metoda pomiaru rozwoju skurczu pojedynczych jednostek. Żeby badać chwilowe zmiany w sile skurczu wskutek zmian wzorca pobudzeń motoneuronów różnych typów jednostek należy przeprowadzić ostre eksperymenty, które ze względu na silnie inwazyjny charakter nie mogą być wykonywane u ludzi. Dlatego badania prowadziłem na ssakach (kot i szczur), które mają bardzo zbliżoną do ludzkiej organizację strukturalną i czynnościową układu nerwowo-mięśniowego. W trakcie eksperymentów prowadzonych na zwierzętach w głębokiej narkozie wykonywałem operację neurochirurgiczną usunięcia wyrostków kolczystych i łuków kręgow wraz z więzadłem żółtym (tzw. laminektomię) oraz preparację mięśni i nerwów kończyny tylnej. Wykorzystywałem metody mikroneurofizjologiczne *in vivo* polegające na elektrycznej stymulacji wyizolowanych cienkich filamentów korzeni brzusznych nerwów rdzeniowych oraz rejestracji aktywności mechanicznej i elektromiograficznej czynnościowo izolowanych jednostek ruchowych. Dzięki zastosowaniu tych metod mogłem przy pomocy odpowiednio zaprojektowanych protokołów stymulacji elektrycznej:

- określać efektywność narastania i obniżania się siły skurczu jednostek ruchowych, analizując interakcję pomiędzy stopniowo wzrastającą lub malejącą częstotliwością stymulacji a rozwijaną siłą skurczu (tzw. krzywa siła-częstotliwość) - szczególnie istotna w analizie jest środkowa część krzywej siła-częstotliwość, ponieważ odpowiada ona zakresowi częstotliwości wyładowań motoneuronów podczas naturalnej aktywności dowolnej i zarazem tylko w tym zakresie rozwijana siła podlega regulacji przez zmiany częstotliwości pobudzeń.
- określać podstawowe parametry czasowe i siłowe oraz opisywać zależności pomiędzy częstotliwością pobudzeń a parametrami skurczu jednostek ruchowych – rozwijana siła zależy od czasu skurczu pojedynczego, ponieważ jednostki o długim czasie skurczu pojedynczego wymagają niższej częstotliwości pobudzeń do osiągnięcia określonego poziomu siły niż jednostki o krótkim czasie trwania skurczu pojedynczego;
- wpływać na czas aktywności jednostek ruchowych, indukować procesy wzmocnienia siły skurczu oraz zmęczenia i określać częstotliwość stymulacji, wskutek której skurcz jednostek ruchowych jest najbardziej wydajny;
- symulować wzorce wyładowań jednostek ruchowych obserwowane podczas skurczów dowolnych mięśni człowieka i badać modulację siły skurczu jednostek u zwierząt laboratoryjnych;
- dokonywać pomiarów potencjałów czynnościowych jednostek ruchowych i określać zależności pomiędzy parametrami elektrycznymi i mechanicznymi podczas skurczów jednostek ruchowych.

CZYNNIKI DETERMINUJĄCE ROZWÓJ I REGULACJĘ SIŁY SKURCZU JEDNOSTEK RUCHOWYCH

Wpływ wzmocnienia i zmęczenia na wydajność skurczu jednostek ruchowych

Celem badań było określenie w różnych typach jednostek optymalnej częstotliwości stymulacji, podczas której wygenerowany został skurcz tężcowy charakteryzujący się największą wydajnością na jeden pobudzający impuls. Zdolność jednostek ruchowych do generowania siły podczas powtarzanych skurczów zależy od poprzedzającej historii aktywności. Istnieją dwa główne procesy, tj. wzmocnienie i zmęczenie, które modulują siłę i czas skurczu jednostki ruchowej. W przeprowadzonych badaniach jednostki ruchowe były stymulowane w powtarzany sposób stopniowo wzrastającą częstotliwością stymulacji w celu wywołania efektów wzmocnienia i zmęczenia podczas skurczów izometrycznych (**Łochyński D., Celichowski J., Korman P., Rąglewska P., 2007, Changes of motor unit contractile output during repeated activity, Acta Neurobiologiae Experimentalis, 67, 23-33**). Pole pod zapisem siły skurczu jest wypadkową siły i czasu skurczu. W mechanice klasycznej określa się tę wielkość jako popęd siły. Wymieniony parametr służy do wyrażenia wydajności skurczu mięśnia i jednostki ruchowej. Im większy popęd siły wygenerowany podczas skurczu, tym większa wydajność tego skurczu. W badaniach założono, że wzmocnienie znacząco zwiększy popęd siły generowany na jeden bodziec podczas stymulacji tężcowej i będzie temu towarzyszyło znaczące obniżenie częstotliwości stymulacji niezbędnej do wywołania optymalnego skurczu tężcowego. Z drugiej strony została również sformułowana hipoteza, że zmęczenie zmniejszy popęd siły i spowoduje znaczące zwiększenie częstotliwości stymulacji wymaganej do wygenerowania skurczu optymalnego. Te założenia w przeważającej mierze się sprawdziły w przypadku szybkich jednostek typu FF i FR oprócz tego, że w stanie wzmocnienia w jednostkach typu FR nie zmniejszyła się częstotliwość niezbędna do wygenerowania optymalnego skurczu tężcowego. W jednostkach wolnych nie zaobserwowano żadnych zmian w generowanym popędie siły, ani częstotliwości stymulacji podczas zastosowanego protokołu stymulacji. Uzyskane zmiany w częstotliwości stymulacji znajdują potwierdzenie w zmianach częstotliwości wyładowań jednostek ruchowych, obserwowanych w stanie wzmocnienia i zmęczenia podczas skurczów dowolnych u ludzi.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Praca wykazała, że wzmocnienie zwiększa wydajność skurczu szybkich jednostek ruchowych. Ponadto, w jednostkach FF większa wydajność skurczu uzyskiwana jest przy niższej częstotliwości stymulacji. W związku z tym można przypuszczać, że

efektywność takiego skurczu wzrasta, tzn. mniejszy jest wydatek energetyczny niezbędny na wygenerowanie optymalnego skurczu tężcowego (wyższa ekonomia skurczu). Z drugiej strony zmęczenie zmniejsza wydajność i efektywność skurczu (z powodu wzrostu częstotliwości stymulacji niezbędnej do wywołania optymalnego skurczu) w jednostkach szybkich. Zdolność wolnych jednostek do wytwarzania skurczów podczas przedłużonej, powtarzanej aktywności nie zmienia się.

STARZENIE SIĘ

W ostatnich dekadach obserwuje się nasilenie starzenia się populacji ludzkiej. Szacuje się, że ten trend demograficzny może się pogłębiać. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego odsetek mieszkańców Polski w wieku 65 lat i więcej wzrośnie, w okresie od 2010 do 2020 roku, o 1-2%, a w 2030 roku odsetek ludzi starszych w całej populacji będzie wynosił 23,8% (GUS, 2010). Procesowi starzenia towarzyszy znaczący spadek potencjalnych zdolności funkcjonalnych układu ruchu na skutek niekorzystnych zmian zachodzących w tkance nerwowej i mięśniowej. Ponieważ ludzkie ciało porusza się dzięki skurczom mięśni, wszelkie zmiany czynnościowe zachodzące w jednostkach ruchowych pod wpływem starzenia się powodują również istotne zmiany w zdolności wykonywania ruchów dowolnych oraz lokomocji.

Wpływ starzenia się na wzmocnienie siły oraz prędkość rozwoju siły skurczu wskutek dubletu

Celem badań przeprowadzonych w naszym laboratorium było zweryfikowanie wpływu starzenia się organizmu na zdolność poprawy parametrów skurczu po eksperymentalnym wywołaniu dubletu oraz na prędkość rozwoju siły skurczu jednostek ruchowych (**Łochyński D., Kaczmarek D., Krutki P., Celichowski J., 2010, Effect of ageing on the force development in tetanic contractions of motor units in rat medial gastrocnemius muscle, Mechanisms of Ageing and Development, 131, 545-553**). Podczas naturalnych skurczów mięśni jednostki ruchowe ludzi i innych ssaków często rozpoczynają swoją aktywność od wyładowania dwóch potencjałów czynnościowych, tzw. dublet, o bardzo krótkim odstępie czasu między nimi (< 10 ms). Zjawisko to powoduje przejściowe wzmocnienie siły, popędu siły oraz prędkości rozwoju siły skurczu tężcowego. Jednostki ruchowe prawdopodobnie stosują taką strategię w sytuacji, gdy niezbędne jest gwałtowne zwiększanie siły i prędkości siły skurczu dowolnego mięśnia szkieletowego. Szczególnie istotnym parametrem z funkcjonalnego punktu widzenia jest prędkość rozwoju siły skurczu mięśni szkieletowych, gdyż u ludzi wykryto związek pomiędzy uzyskiwanymi wartościami tego parametru a zdolnością do chodzenia, poruszania się po schodach oraz skłonnością do upadków osób starszych. Wykazano, że prędkość

rozwoju siły podczas skurczów dowolnych mięśni szkieletowych maleje podczas starzenia się organizmu. W omawianych badaniach dokonano eksperymentalnej symulacji dubletów jednostek ruchowych, które obserwowane są podczas skurczów dowolnych mięśni u ludzi. Uzyskane wyniki wykazały, że bezwzględna siła generowana na skutek dubletu, w procesie starzenia się organizmu w jednostkach FF ulega przejściowemu wzrostowi, natomiast w jednostkach S zwiększa się stopniowo. Jest to prawdopodobnie spowodowane wzrostem wskaźnika unerwienia tych jednostek, co w konsekwencji powoduje wzrost ich siły skurczu. Natomiast we wczesnym etapie procesu starzenia, w jednostkach szybkich FF i FR, maleje wywołany wskutek dubletu względny przyrost siły oraz popędu siły, mierzony w stosunku do skurczu wywołanego taką samą stymulacją, lecz nie rozpoczynającą się dubletem. Powodem tego zjawiska może być bardziej skuteczne sumowanie się skurczów składowych podczas skurczów wywołanych bez dubletu. W konsekwencji powoduje to mniejszą względną efektywność dubletu w „naddawaniu” siły i popędu siły u osobników starych. Ponadto, w procesie starzenia się w jednostkach S wzrasta bezwzględna, natomiast w jednostkach typu FR wzrasta względna (wyrażona w wartościach procentowych w stosunku do siły maksymalnej) prędkość wzrostu siły i popędu siły podczas wczesnej i późnej fazy rozwoju siły maksymalnego skurczu tężcowego. W bardzo zaawansowanym wieku również w jednostkach typu FF wzrasta względna i bezwzględna prędkość generowania siły i popędu siły, lecz tylko podczas późnej fazy rozwoju siły maksymalnego skurczu tężcowego. W różnych typach jednostek przyczyny tych zmian mogą być odmienne, np. wzrost wskaźnika unerwienia (szczególnie w jednostkach S), procesy transformacyjne włókien mięśniowych (szczególnie w jednostkach FR) lub wzrost sztywności włókien mięśniowych i tkanki łącznej okalającej (szczególnie w jednostkach FF).

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Uzyskane w pracy wyniki wskazują, że 1) bezwzględny wzrost siły jednostek ruchowych na skutek dubletu może być jedną z podstawowych przyczyn mniejszej stabilności ruchów osób starszych (wzrostu drżenia fizjologicznego) podczas submaksymalnych skurczów dowolnych mięśni.; 2) przyczyny obniżania się prędkości rozwoju siły skurczu mięśni u osobników starszych nie są powodowane pogarszaniem się tempa rozwoju siły skurczu przetrwałych jednostek ruchowych; 3) proces ten może być spowodowany osłabieniem siły mięśni wskutek atrofii spowodowanej obumieraniem jednostek ruchowych oraz zaburzeniami w neuronowych mechanizmach kodowania częstotliwości wyładowań jednostek ruchowych np. zmniejszeniem się maksymalnych częstotliwości wyładowań oraz mniej dynamicznym przyrostem częstotliwości wyładowań jednostek ruchowych podczas stopniowo wzrastającej siły mięśnia.

WIBRACJA CAŁEGO CIAŁA

Skuteczność wibracji całego ciała (WBV) w zwiększaniu siły i mocy u ludzi została potwierdzona na poziomie całych mięśni szkieletowych po kilku-kilkunastotygodniowej ekspozycji na wibrację. W literaturze pojawiło się szereg doniesień o korzystnym wpływie kilkutygodniowego treningu wibracyjnego na statykę ciała, mobilność i wzrost siły mięśni u ludzi starszych oraz dynamiczną siłę mięśni osób młodych i sportowców wyczynowych. Sugeruje się również, że WBV może być stosowana profilaktycznie w zapobieganiu utracie siły i mocy mięśniowej podczas procesu starzenia, która zaczyna być już widoczna pomiędzy 40 a 50 rokiem życia.

Celem jednego z ostatnich projektów, finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki (realizowanym przez Zakłady Neurobiologii, Biochemii i Higieny Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu we współpracy z Zakładem Biochemii Instytutu Biologii Doświadczalnej im. Marcelego Nenckiego w Warszawie), w którym byłem głównym wykonawcą, było zweryfikowanie wpływu wibracji całego ciała na parametry mechaniczne, regulację siły skurczu jednostek ruchowych, ekspresję ciężkich łańcuchów miozynowych w mięśniu oraz na metabolizm tkanki kostnej. Wibracja całego ciała zyskała w ostatnim czasie znaczące zainteresowanie, ponieważ nie wymaga od osoby ćwiczącej wykonywania intensywnego wysiłku fizycznego, a z literatury wynika, że kilkutygodniowa ekspozycja na wibrację wpływa na wzrost siły mięśni szkieletowych u ludzi starszych oraz poprawę siły dynamicznej u sportowców. Z klinicznego punktu widzenia jest to istotna zaleta, ponieważ u osób starszych stan zdrowia często nie pozwala na wykonywanie intensywnych ćwiczeń.

Wpływ wibracji całego ciała na rozwój siły skurczu jednostek ruchowych i zawartość ciężkich łańcuchów miozynowych w mięśniu

W celu zweryfikowania, czy powtarzana stymulacja WBV powoduje zmiany w regulacji siły skurczu oraz parametrach skurczu szybkich jednostek ruchowych i kompozycji ciężkich łańcuchów miozynowych w mięśniu, w naszym laboratorium badane zwierzęta zostały poddane specjalnemu protokołowi WBV, którego zadaniem była efektywna aktywacja szybkich jednostek ruchowych. U ludzi podczas krótkotrwałych ekspozycji na wibrację całego ciała, w zapisach aktywności elektrycznej mięśni, rejestrowanych za pomocą elektromiografii (EMG) powierzchniowej, obserwuje się wzrost mocy wysokoczęstotliwościowych komponentów w widmie sygnału EMG. Na podstawie tej obserwacji zasugerowano, że podczas WBV może dochodzić do zwiększonej rekrutacji wysokoprogowych jednostek ruchowych (prawdopodobnie szybkich), choć niskoprogowe jednostki ruchowe (prawdopodobnie wolne) są również aktywowane i aktywnie uczestniczą w utrzymywaniu

stabilnej postawy ciała podczas wibracji. Zasugerowano również, że wzmożona aktywność jednostek szybkich przyczynia się do skuteczniejszego tłumienia pionowych oscylacji generowanych podczas WBV.

Uważa się, że powtarzane stosowanie wibracji całego ciała może poprawiać parametry skurczu jednostek szybkich i w ten sposób przyczyniać się do obserwowanego u osób starych i młodych zwiększenia siły dynamicznej. Dlatego w naszych badaniach częstotliwość wibracji platformy (50 Hz) została zaprogramowana w taki sposób, aby wywołać tzw. efekt rezonansu w tkance mięśniowej. Wcześniejsze doniesienia wykazały bowiem, że w takich warunkach moc tłumiąca i aktywność elektryczna mięśni podczas WBV jest największa. Wibracja całego ciała była wykonywana przy użyciu komercyjnie dostępnej platformy do wibracji (Power Plate), 5 razy w tygodniu, podczas 4 półminutowych (razem 2 minuty) ekspozycji na wibrację dziennie. Badania zostały przeprowadzone u dorosłych szczurów. Pomiary kontrolne zostały wykonane po pięciu tygodniach oraz po trzech i sześciu miesiącach od rozpoczęcia wibracji. Badana była maksymalna siła, czas i prędkość rozwoju siły skurczu, zależność siły od częstotliwości stymulacji oraz odporność na zmęczenie jednostek ruchowych - parametry te bezpośrednio wpływają na efektywność skurczu mięśnia. Ponadto w mięśniu brzuchatym przyśrodkowym określano zawartość różnych typów ciężkich łańcuchów miozyny, których ekspresja jest powiązana z właściwościami skurczu mięśnia. Pięciotygodniowy okres wibracji spowodował: 1/ wzrost siły najsilniejszych i najszybszych jednostek FF (zaobserwowano również tendencję wzrostu siły w jednostkach S), 2/ skrócenie czasu skurczu jednostek FR, 3/ skrócenie czasu rozkurczu we wszystkich typach jednostek, 4/ przesuwanie się krzywych siła częstotliwość w kierunku wyższych częstotliwości stymulacji w jednostkach S i FR (**Łochyński D., Bączyk M., Kaczmarek D., Rędownicz M.J., Celichowski J., Krutki P., 2012, Adaptations in physiological properties of rat motor units following 5 weeks of whole-body vibration. Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism, 38 (9), 913-921**). Maksymalna prędkość rozwoju siły skurczu i odporność na zmęczenie jednostek oraz zawartość ciężkich łańcuchów miozynowych w mięśniu nie uległy zmianie. Jednak po trzech miesiącach obserwowany wcześniej wzrost siły jednostek FF nie był już widoczny, a skrócenie czasu skurczu i rozkurczu utrzymało się tylko w jednostkach FR (**Łochyński D., Kaczmarek D., Celichowski J., Rędownicz M.J., Krutki P., 2013, Long-term effects of whole-body vibration on motor unit contractile function and myosin heavy chain composition in the rat medial gastrocnemius. Journal of Musculoskeletal and Neuronal Interactions, 13 (4): 430-441**). Wzrosła natomiast siła skurczu jednostek S i odporność na zmęczenie jednostek FR. Ponadto w mięśniu zmniejszyła się zawartość ciężkich łańcuchów miozynowych typu I (występujących we włóknach jednostek S) i wzrosła zawartość typu IIax (występujących w jednostkach FR). Po sześciu miesiącach wibracji wszystkie opisane powyżej zmiany adaptacyjne w parametrach skurczu uległy wycofaniu. Jedyłą

charakterystyczną zmianą, która była obserwowana podczas całego okresu wibracji było zmniejszenie stosunku siły skurczu pojedynczego i tężcowego maksymalnego w jednostkach FR i S.

Uzyskane wyniki implikują kilka wniosków natury poznawczej i praktycznej. Po pierwsze, wcześniejsze wyniki badań dostarczyły pewnych dowodów, że jedną z istotnych funkcji układu nerwowo-mięśniowego jest aktywne tłumienie zewnętrznych drgań wywieranych na tkanki organizmu poprzez cykliczną aktywację jednostek szybkich. Dlatego można przypuszczać, że skrócenie czasu skurczu i relaksacji oraz przesunięcie się krzywych siła-częstotliwość w kierunku wyższych częstotliwości drażnienia, obserwowane w jednostkach FR po 5 tygodniach i 3 miesiącach wibracji, może przyczynić się do optymalizacji tłumienia wytwarzanych przez wibrację oscylacji. Zaobserwowane zmiany adaptacyjne mogą spowodować zwiększenie zdolności tych jednostek do harmonicznego odpowiadania skurczem na cykliczne drgania platformy. Jednak po 6 miesiącach wibracji te zmiany nie są już widoczne, natomiast ciągle utrzymuje się zmniejszenie wartości stosunku siły skurczu pojedynczego do tężcowego maksymalnego w jednostkach S i FR, które wskazuje na zmniejszenie sztywności włókien mięśniowych tych jednostek. Zmniejszenie sztywności (wzrost elastyczności) jednostki mięśniowo-ścięgnistej powoduje wzrost zdolności do biernego (pasywnego) tłumienia cyklicznych drgań mechanicznych - większa podatność tkanek miękkich na bodźce mechaniczne zmniejsza amplitudę ich oscylacji. Można więc przypuszczać, że po długotrwałym okresie wibrowania mechanizm aktywnego tłumienia drgań przestaje pełnić istotną rolę na rzecz mechanizmu biernego. Po drugie, natężenie bodźca mechanicznego podczas wibracji całego ciała jest wystarczające, by po odpowiednim czasie zastosowania zwiększyć maksymalną siłę skurczu zarówno najsilniejszych jak i najsłabszych jednostek ruchowych. Wzrost siły skurczu jednostek FF może przyczynić się do poprawy siły eksplozywnej, zjawiska opisanego w literaturze po krótkotrwałej ekspozycji na wibrację całego ciała. Natomiast dłuższy (trzy miesięczny) okres wibracji może wpływać na polepszenie stabilizacji stawów kończyn dzięki wzrostowi siły jednostek S. Po trzecie, 3 miesięczna wibracja całego ciała powoduje podobną transformację ciężkich łańcuchów miozynowych w mięśniu jak w wyniku treningu eksplozywnego. Po czwarte, zmiany w maksymalnej prędkości rozwoju siły skurczu jednostek ruchowych nie są odpowiedzialne za opisane w literaturze zwiększenie siły dynamicznej mięśni szkieletowych obserwowane po krótkotrwałych ekspozycjach na wibrację całego ciała.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Prace wykazały, że w odpowiedzi na taki sam protokół wibracji: 1) w różnych typach jednostek ruchowych występują podobne (skrócenie czasu relaksacji) i odmienne zmiany adaptacyjne w parametrach skurczu (wzrost siły w jednostkach S i FF,

skrócenie czasu skurczu i przesunięcie zależności siła-częstotliwość w kierunku niższych częstotliwości stymulacji w jednostkach FR); 2) zmiany w właściwościach skurczu pojawiają się w różnych okresach po rozpoczęciu wibracji w różnych typach jednostek; 3) po 6 miesiącach wibracji zanika większość wcześniej obserwowanych zmian adaptacyjnych w parametrach skurczu jednostek ruchowych.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

(Główne zainteresowania, kierunki i osiągnięcia w zakresie prowadzonych badań przed i po otrzymaniu stopnia doktora)

5.1. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA PRZED UZYSKANIEM STOPNIA NAUKOWEGO DOKTORA

Pracę naukową rozpocząłem w Zakładzie Neurobiologii. Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora moje główne zainteresowania badawcze były zorientowane na lepsze poznanie czynności i funkcji jednostek ruchowych. Pod kierunkiem prof. dr hab. Piotra Krutkiego, w ramach dorobku do doktoratu, brałem udział w dwóch projektach mających na celu określenie biologicznych i fizjologicznych uwarunkowań wpływających na parametry mechaniczne i regulację siły skurczu jednostek ruchowych. Poniżej krótko przedstawiłem główne założenia i wyniki najważniejszych badań.

Porównanie parametrów czynnościowych jednostek ruchowych u dwóch gatunków ssaków

Pierwsze badania, w których brałem udział, miały na celu określenie czynnościowych różnic w skurczu jednostek ruchowych mięśnia brzuchatego łydki kota i szczura (*Krutki P., Celichowski J., Łochyński D., Pogrzebna M., Mrówczyński W., 2006, Interspecies differences of motor units properties of medial gastrocnemius muscle of rat and cat, Archives Italiennes de Biologie, 144, 11-23*). Odkryliśmy, że istnieją znaczące międzygatunkowe różnice ilościowe w proporcjach oraz cechach skurczu jednostek ruchowych tego mięśnia szkieletowego. Na przykład u kota szybkie jednostki ruchowe są silniejsze 7-8 razy a wolne 2-5 razy od jednostek szczura. Natomiast czasy skurczu jednostek szybkich i wolnych były około 2 krotnie dłuższe u kota niż u szczura. Różnice te prawdopodobnie są spowodowane odmienną liczbą oraz strukturą jednostek ruchowych wchodzących w skład mięśnia, w tym liczbą unerwianych włókien mięśniowych przez pojedynczy motoneuron i średnicą przekroju poprzecznego włókien mięśniowych, jak również odmienną dynamiką procesów

elektromechanicznych i biochemicznych zachodzących podczas skurczu. Przyczyny tego zróżnicowania mogą być uwarunkowane różnicami w rozmiarze i masie ciała oraz specyficznym biologicznym przystosowaniem do odmiennej aktywności dobowej obydwu badanych gatunków. Szczury są przyzwyczajone do szybkiego chodzenia i truchtu podczas eksplorowania środowiska przez większą część doby. Natomiast koty większość czasu dobowego spędzają na spaniu lub odpoczynku (od 16 do 23 h) i wykazują wytężoną aktywność fizyczną (bieg, skok) tylko podczas bardzo krótkich okresów czasowych (od kilku sekund do minut). Ponadto występują znaczące różnice w szybkości poruszania się tych zwierząt np. u szczurów cykl chodu dla kończyn tylnych trwa około 300-400 ms a u kotów 700-800 ms. Uzyskane wyniki mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia przystosowań czynnościowych zachodzących u ludzi, u których wystąpiły zmiany w całkowitym czasie i formie dobowej aktywności ruchowej np. jej zwiększenia (różne formy treningowe w ramach rehabilitacja ruchowej, zajęcia rekreacyjne) lub zmniejszenia (unieruchomienie).

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Praca wykazała, że istnieją znaczące zróżnicowania w proporcji i cechach skurczu jednostek ruchowych tego samego mięśnia u różnych gatunków zwierząt, które mogą być uwarunkowane różnicami w rozmiarze i masie ciała, całkowitym czasie dobowej aktywności fizycznej, prędkości poruszania się i wzorcu lokomocji.

Wpływ poprzedzających skurczów na rozwój siły jednostek ruchowych

Kolejne badania miały na celu zweryfikowanie w jaki sposób poprzedzająca aktywność skurczowa może wpływać na rozwój siły podczas następczych skurczów jednostek ruchowych mięśnia kota (*Celichowski J., Krutki P., Łochyński D., Grottel K., Mrówczyński W., 2004, The tetanic depression in fast motor units of the cat gastrocnemius muscle, Journal of Physiology and Pharmacology, 55, 291-303*). Siła skurczu jednostek ruchowych regulowana jest za pomocą kodowania (zwiększania lub zmniejszania) częstotliwości wyładowań potencjałów czynnościowych przez aktywne motoneurony. Nawet niewielka zmiana częstotliwości generowanych bodźców znacząco modyfikuje wyjściową siłę skurczu. Najslabszym skurczem jest skurcz pojedynczy, który powstaje po pobudzeniu włókien mięśniowych jednostki tylko jednym potencjałem czynnościowym. W przypadku, gdy ciągi impulsów z układu nerwowego generowane są w niewielkich odstępach czasu, skurcze pojedyncze (składowe) zaczynają się nakładać na siebie (sumować) i jednostka generuje skurcz tężcowy. Poziom siły (amplituda) takiego skurczu zależy od stopnia nakładania się kolejnych skurczów pojedynczych (tzw. stopnia wypełnienia). Gdy wzrasta częstotliwość pobudzeń rośnie też stopień wypełnienia i siła skurczu. Wyniki wcześniejszych badań przeprowadzanych w Zakładzie Neurobiologii na jednostkach ruchowych szczura wykazały

jednak, że rozwój siły skurczu tężcowego nie jest bezwzględnie uzależniony od częstotliwości generowanych bodźców. Odkryto, że poprzedzająca niska częstotliwość potencjałów czynnościowych przebiegających po aksonach motoneuronów powoduje istotne obniżenie zdolności rozwoju siły skurczu jednostki ruchowej generowanej w odpowiedzi na następczą wyższą częstotliwość bodźców elektrycznych. Okazało się, że jest to właściwość charakterystyczna tylko dla szybkich jednostek ruchowych, charakteryzujących się dużą dynamiką procesów sprzężenia elektromechanicznego. Ponieważ zjawisko to powodowało obniżenie zdolności generowania siły podczas skurczów tężcowych niezupełnych, zostało nazwane „tetanic depression”. Celem przeprowadzonych eksperymentów było zweryfikowanie, czy to zjawisko jest bardziej powszechne i występuje również u innych większych ssaków. Wykazaliśmy, że jest ono obecne również w mięśniu kota i bardziej nasilone w jednostkach typu FR niż FF. Ponadto największe efekty obniżenia siły skurczu zaobserwowano przy niskich częstotliwościach stymulacji.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Badania wykazały, że zjawisko „tetanic depression” występuje w szybkich jednostkach ruchowych większych ssaków, takich jak kot i prowadzi do znacznego pogorszenia efektywności rozwoju siły skurczu jednostek ruchowych.

Wpływ starzenia się na regulację siły skurczu jednostek ruchowych

W ramach badań ukierunkowanych na przygotowanie pracy doktorskiej zainteresowałem się wpływem procesu starzenia na regulację siły skurczu jednostek ruchowych. W przeciwieństwie do dobrze poznanych efektów wpływu starzenia się na fizjologię skurczu mięśni, zmiany czynnościowe zachodzące w jednostkach ruchowych są mniej zrozumiałe. Z nielicznych badań wykonanych na szczurach wynika, że zmniejsza się maksymalna siła skurczu tężcowego zupełnego jednostek szybkich (FF i FR), natomiast jednostek wolnych (S) wzrasta dwukrotnie. Czasy skurczu i rozkurczu wydłużają się zarówno w jednostkach szybkich i wolnych. Jednak nie opisano dotychczas w jaki sposób zmieniają się podstawowe cechy skurczu jednostek ruchowych mięśni szkieletowych w kolejnych etapach procesu starzenia się oraz jaki jest wpływ i znaczenie tych zmian w mechanizmach sterowania skurczem jednostek ruchowych. Założeniem badawczym było określenie kierunku i dynamiki zmian podstawowych cech skurczu oraz efektywności sumowania skurczów jednostek ruchowych szczura podczas starzenia się organizmu. Podjąłem również próbę określenia częstotliwości stymulacji przy której generowana jest najwyższa wydajność skurczu. W tym celu u osobników dorosłych oraz starych w różnych etapach procesu starzenia mierzone było pole pod zapisem siły skurczu pojedynczego w skurczach

tęzcowych niepełnych, wywołanych drażnieniem aksonów poszczególnych typów jednostek ruchowych z różną częstotliwością stymulacji. Wyniki pokazały, że zmiany właściwości mechanicznych i regulacji siły skurczu jednostek ruchowych są dynamiczne i podczas starzenia się zachodzą z odmienną intensywnością w różnych typach jednostek ruchowych. Zaobserwowano, że w początkowym okresie starzenia się zależność pomiędzy częstotliwością stymulacji i generowaną siłą jest przesuniętą w kierunku niższych częstotliwości stymulacji. Na skutek wydłużania się parametrów czasowych skurczu, jednostki ruchowe osobników starych mogą uzyskać taką samą względną siłę skurczu przy niższych częstotliwościach stymulacji, a tempo przyrostu siły skurczu podczas wzrostu częstotliwości drażnienia jest większe. Dopiero w bardzo zaawansowanym wieku zależność ta przesuwana się z powrotem w kierunku wyższych częstotliwości. Wydajność skurczu jednostek ruchowych wolnych typu S (oceniana na podstawie pomiaru powierzchni pola pod zapisem siły skurczu, powstałego na skutek pojedynczego potencjału czynnościowego) wzrasta u szczurów starych. Zauważono także, że siła i wydajność skurczu jednostek szybkich podatnych na zmęczenie typu FF, przetrwałych aż do starości, również wzrasta przejściowo podczas starzenia się. W rezultacie każdy pojedynczy potencjał czynnościowy wywołuje znacząco większą odpowiedź mechaniczną u osobników starych niż u młodych. Jest to związane z obserwowanymi zmianami czasowymi (wydłużeniem) i siłowymi (wzrostem) parametrów skurczu pojedynczego. Uzyskane wyniki mogą tłumaczyć opisane w literaturze obserwacje, że mięśnie należące do starych osobników stają się nieco bardziej odporne na zmęczenie podczas wysiłków wykonywanych na takim samym, jak u osobników młodych, względnym poziomie siły w stosunku do siły maksymalnej. Praktyczną implikacją badań jest to, że dobór parametrów do zabiegu przez-skórnej elektrycznej stymulacji nerwowo-mięśniowej powinien być oparty na zachodzących z wiekiem zmianach efektywności sumowania siły skurczu jednostek ruchowych. Zastosowanie takich samych zakresów częstotliwości, jak u osobników młodych, będzie powodowało u starych osobników generowanie silniejszych skurczów tęzcowych, charakteryzujących się wysokim stopniem wypełnienia. Taki zabieg może być gorzej tolerowany, powodować szybsze męczenie się mięśni oraz spowodować niezamierzone zmiany transformacyjne w strukturze i metabolizmie włókien mięśniowych.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIAGNIĘCIA AUTORA:

Na podstawie tych badań powstała praca doktorska pt. Wpływ starzenia się organizmu na regulację siły skurczu jednostek ruchowych w modelu zwierzęcym, która została obroniona dnia 27 czerwca 2006 r. Badania wykazały, że w początkowym etapie starzenia się wydajność skurczów jednostek ruchowych wolnych i szybkich podatnych na zmęczenie wzrasta, wydłuża się czas skurczu, a

częstotliwość pobudzeń niezbędna do wygenerowania takiej samej siły jest niższa niż u osobników młodych. Może to powodować, że wydatek energetyczny, niezbędny do wygenerowania skurczów tężcowych o takiej samej sile, jest niższy w jednostkach ruchowych u osobników starych niż młodych (wzrost efektywności skurczu). W efekcie ta sama względna siła i popęd siły są uzyskiwane przy zredukowanej częstotliwości stymulacji i liczbie pobudzeń. Dopiero w bardzo zaawansowanym wieku te korzystne zmiany w wydajności i efektywności sumowania siły skurczu ulegają uwstecznieniu na skutek skrócenia się czasu skurczu oraz relaksacji jednostek ruchowych.

5.2. DZIAŁALNOŚĆ NAUKOWO-BADAWCZA PO UZYSKANIU STOPNIA NAUKOWEGO DOKTORA

Wyniki uzyskane w badaniach prowadzonych w ramach rozprawy doktorskiej zostały uzupełnione o dodatkowe analizy i posłużyły do przygotowania pracy, która została opublikowana w prestiżowym czasopiśmie *Experimental Gerontology* (Łochyński D., Krutki P., Celichowski J., 2008, *Effect of ageing on the regulation of motor unit force in rat medial gastrocnemius*, *Experimental Gerontology*, 43, 218-228). W 2009 za pracę doktorską otrzymałem nagrodę J.M. Rektora Akademii Wychowania Fizycznego - brązowy medal im. Jędrzeja Śniadeckiego.

Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora, we współpracy z Zakładem Neurobiologii, kontynuowałem pracę badawczą dotyczącą wcześniej realizowanej tematyki modulacji i regulacji siły skurczu jednostek ruchowych. Moja pierwsza praca po doktoracie miała na celu określenie w różnych typach jednostek optymalnej częstotliwości stymulacji, podczas której zostanie wygenerowany skurcz tężcowy charakteryzujący się największą wydajnością na jeden pobudzający impuls. Przedmiotem wymienionych badań było określenie parametrów stymulacji wywołującej taki skurcz w warunkach bez oraz w stanie wzmocnienia siły i po zmęczeniu.

Kolejne badania były ukierunkowane na wyjaśnienie, czy wcześniej odkryte zjawisko depresji tężcowej wpływa istotnie na rozwój siły skurczu, generowanej wskutek wzorców wyładowań jednostek ruchowych, które obserwowane są u ludzi podczas skurczów mięśni wykonywanych za pomocą własnej woli. Inne badania dotyczyły oceny zmian w regulacji siły skurczu jednostek ruchowych wskutek starzenia się organizmu. W rezultacie badań nad pracą jednostek ruchowych, prowadzonych w modelu zwierzęcym, we współpracy z Instytutem Biofizyki i Inżynierii Biomedycznej Bułgarskiej Akademii Nauk, uczestniczyłem w projekcie mającym na celu symulowanie pracy jednostek ruchowych człowieka w oparciu o

4-parametrową funkcję analityczną, zaimplementowaną w oprogramowaniu MotCo. W ramach tych badań stworzony został przeze mnie autorski projekt aparatu do pomiarów parametrów mechanicznych oraz aktywności elektrycznej mięśni zginaczy i prostowników stawu łokciowego u ludzi. Aparat umożliwia przeprowadzanie standaryzowanych pomiarów, które mogą być wykonywane w warunkach zredukowanego wpływu grawitacji.

Wpływ zjawiska „tetanic depression” na rozwój siły skurczu jednostek ruchowych

Głównym założeniem kolejnych badań było określenie, czy zjawisko „tetanic depression” może wpływać na ograniczenie rozwoju siły skurczu w warunkach fizjologicznych. W tym celu zaplanowaliśmy dwa eksperymenty. W pierwszym symulowaliśmy regulację siły skurczu zachodzącą u ludzi podczas skurczów dowolnych mięśni o stopniowo wzrastającej i malejącej sile (**Łochyński D., Celichowski J., 2009, Tetanic depression and catch-like effect in fast motor units at linearly increasing and decreasing stimulation frequencies, Journal of Muscle Research Cell Motility, 30 153-160**). Podczas takich skurczów jednostki ruchowe przez pewien czas modyfikują (zwiększają lub zmniejszają) swoje częstotliwości wyładowań w sposób liniowy. Okazało się, że generowana siła skurczu była zawsze znacząco niższa, gdy częstotliwość drażnienia prądem elektrycznym liniowo wzrastała, niż gdy liniowo opadała, mimo że w obu przypadkach zastosowane częstotliwości stymulacji były takie same. Ten eksperyment wykazał, że depresja tężcowa istotnie przyczyniła się do tzw. zjawiska histerezy w rozwijanej sile skurczu tężcowego. Jest to spowodowane znaczącym obniżeniem efektywności sumowania się skurczów składowych podczas stopniowo wzrastającej częstotliwości pobudzeń w stosunku do stopniowo malejącej. W trakcie drugiej serii eksperymentów symulowaliśmy sposób wyładowań jednostek ruchowych podczas słabych skurczów dowolnych (izometrycznych) u ludzi (**Celichowski J., Dobrzyńska Z., Łochyński D., Krutki P., 2011, The tetanic depression in fast motor units of mammalian skeletal muscle can be evoked by lengthening of one initial interpulse interval. Experimental Brain Research, 214 (1), 19-26**). Celem było zweryfikowanie, czy wydłużenie tylko pierwszego odstępu pomiędzy ciągiem generowanych bodźców spowoduje depresję tężcową. Odkryliśmy, że zarówno u kotów jak i szczurów taki subtelna modyfikacja przyczynia się do obniżenia rozwoju siły w następnej części skurczu tężcowego. Prawdopodobnie poprzedzająca aktywność skurczowa zmienia chwilowy stan procesów fizjologicznych lub mechanicznych zachodzących we włóknach mięśniowych. W konsekwencji prowadzi to do pogorszenia efektywności rozwoju siły jednostek ruchowych podczas skurczów następczych. Jest to ważne odkrycie nie tylko z punktu widzenia poznawczego, ale i aplikacyjnego. Zaobserwowane zmiany w modulacji siły skurczu wskutek niskiej częstotliwości pobudzeń powinny być uwzględniane podczas programowania wzorców elektrycznej stymulacji mięśni. Ponadto, obecnie trwają prace nad stworzeniem

tw. sztucznych mięśni naśladowujących czynność mięśni szkieletowych. Głównym ich celem jest poprawa funkcjonowania osób niepełnosprawnych, u których doszło do osłabienia lub zaniku siły mięśniowej na skutek różnych chorób genetycznych, neurologicznych, czy też ortopedycznych. Jednym z rozwiązań technologicznych, które zyskały znaczące zainteresowanie są elektroaktywne polimery. Ich cechą charakterystyczną jest zdolność do zmieniania kształtu i rozmiaru (zginania się i prostowania) wskutek działania pola elektrycznego. Zaletą tych rozwiązań jest możliwość ich zintegrowania z układami mikro-elektromechanicznymi w celu uzyskania sprytnych mechanizmów rozruchowych. Jednak dotychczas opracowane właściwości fizyczne systemów kontroli odkształcania i siły naprężania się tych materiałów znacząco odbiegają jakościowo od działania mechanicznego i mechanizmów regulujących skurcz mięśni szkieletowych u organizmów żywych. Dokonane w naszym laboratorium obserwacje, dotyczące zależności pomiędzy zmianami częstotliwości drażnienia prądem elektrycznym i siłą generowaną przez jednostki ruchowe mięśni szkieletowych, mogą być wykorzystane podczas projektowania systemów kontrolujących siły generowane przez sztuczne mięśnie oraz podczas poszukiwania materiałów o odpowiednich właściwościach fizycznych służących do ich produkcji.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Badania wykazały, że 1) „tetanic depression” przyczynia się istotnie do obniżenia efektywności sumowania się skurczów składowych szybkich jednostek ruchowych podczas stopniowo wzrastającej częstotliwości pobudzeń przewodzonych po aksonach motoneuronów do włókien mięśniowych; 2) wydłużenie tylko pierwszego odstępu pomiędzy ciągiem generowanych bodźców powoduje tetanic depression; 3) tetanic depression jest zjawiskiem powszechnie obserwowanym u ssaków i wydaje się kluczowym mechanizmem odpowiedzialnym za wyregulowanie wstępnej siły skurczu szybkich jednostek ruchowych zaraz po ich włączeniu do aktywności.

Wpływ starzenia się na zmiany parametrów mechanicznych i elektrycznych jednostek ruchowych

Celem badań było zweryfikowanie, czy zmiany w cechach skurczu jednostek ruchowych zachodzące pod wpływem starzenia się znajdują odzwierciedlenie w zmianach parametrów potencjałów czynnościowych jednostek. Typowa jednostka ruchowa unerwia dziesiątki lub setki włókien mięśniowych. Na skutek strukturalnej organizacji gałęzi końcowych aksonów, każdy potencjał czynnościowy zainicjowany w komórce ruchowej wywołuje potencjał czynnościowy w każdym unerwianym przez nią włóknie mięśniowym. Zatem każdy potencjał wygenerowany przez motoneuron jest redystrybuowany i wzmocniony w tkance mięśniowej. Dzięki temu możliwe jest zarejestrowanie ciągów potencjałów czynnościowych jednostki

ruchowej, odpowiadających wzrostowi wyładowań motoneuronów, stosując elektrody igłowe wkłuwane do mięśni. Badania przeprowadzone u osób starszych wykazały, że w procesie starzenia się organizmu wzrasta amplituda, liczba zwrotów oraz czas trwania potencjałów czynnościowych jednostek ruchowych. Jednak w badaniach wykonywanych u ludzi nie można było odzwierciedlić zależności pomiędzy zmianami zachodzącymi w parametrach elektrycznych i cechach skurczu (sile, czasie skurczu i podatności na zmęczenie) w różnych typach jednostek ruchowych z powodu inwazyjnego charakteru takich eksperymentów. W tym celu wykonaliśmy ostre doświadczenia na funkcjonalnie zidentyfikowanych jednostkach ruchowych mięśnia brzuchatego przyśrodkowego szczura (*Krutki P., Ciechanowicz-Kowalczyk I., Łochyński D., Celichowski J. Effect of ageing on properties of motor unit action potentials in the rat medial gastrocnemius muscle. Journal of Electromyography and Kinesiology, 23, 1150-1157*). Wyniki wykazały, że w procesie starzenia się w najszybszych i najsilniejszych jednostkach typu FF dochodzi do wydłużenia czasu trwania potencjału, a w jednostkach S do wzrostu liczby zwrotów potencjału czynnościowego. Jednak, mimo że wykryto pozytywne korelacje pomiędzy amplitudą potencjału i maksymalną siłą skurczu we wszystkich typach jednostek ruchowych osobników młodych i starych, zmiany zachodzące w sile podczas starzenia się nie były odzwierciedlone przez adekwatne zmiany w amplitudzie potencjałów czynnościowych. Nie rejestrowano bowiem wzrostu amplitudy potencjałów czynnościowych odpowiadających wzrostowi siły jednostek. Ponadto zaobserwowano, że u osobników młodych wartości amplitud zarejestrowane w jednostkach S były mniejsze niż w FR (zgodnie z rozmiarem obu typów jednostek), natomiast u bardzo starych osobników różnice te nie były widoczne. Obserwowane zmiany w parametrach potencjałów czynnościowych (czasie trwania i liczbie zwrotów) przypuszczalnie odzwierciedlały zmiany w morfologii i fizjologii włókien mięśniowych, zachodzące podczas starzenia się – zmniejszenie średnicy i spowolnienie przewodnictwa potencjału po włóknach mięśniowych oraz zmiany związane z reinerwacją oboczną.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

W pracy wykazano, że niektóre wyraźne zmiany w sile skurczu jednostek ruchowych nie mogą być wykryte na podstawie zmian w parametrach potencjałów czynnościowych podczas badania elektromiograficznego. Jest to istotna informacja, która może być przydatna w interpretacji klinicznych badań elektromiograficznych (np. oszacowywania rozmiaru jednostek ruchowych) dokonywanych na podstawie skurczów dowolnych u osób starszych.

Model mięśnia szkieletowego i symulacja kontroli aktywności jednostek ruchowych przy użyciu hierarchicznego algorytmu genetycznego

W ostatnim czasie, we współpracy z Instytutem Biofizyki i Inżynierii Biomedycznej Bułgarskiej Akademii Nauk został stworzony nowy model mięśnia człowieka, który symuluje siły rozwijane przez jednostki ruchowe, obliczane na podstawie sumowania ich skurczów pojedynczych (generowanych w odpowiedzi na pojedyncze potencjały czynnościowe). Model został oparty na zaimplementowanej w oprogramowaniu MotCo 4-parametrowej funkcji analitycznej stworzonej na podstawie precyzyjnych pomiarów siły skurczu pojedynczego jednostek ruchowych, uzyskanych eksperymentalnie z mięśnia szczura. Dotychczas obowiązujące uproszczenia użyte w modelach makro-biomechanicznych istotnie odbiegają od rzeczywistości, ponieważ przyjmują, że wyłącznym generatorem siły mechanicznej jest mięsień szkieletowy. W modelach tych zwykle zakłada się, że siła mięśnia jest kontrolowana przez pojedynczy, ciągły „sygnał aktywujący”. Tymczasem najmniejszym funkcjonalnym składnikiem mięśnia jest jednostka ruchowa. Siła generowana przez jednostki kontrolowana jest za pomocą potencjałów czynnościowych generowanych z różną częstotliwością (zmiennymi odstępami czasowymi pomiędzy kolejnymi potencjałami) przez motoneurony. W rzeczywistości generowana siła mięśnia jest więc sumą sił wszystkich aktywnych w danym momencie jednostek ruchowych, należących do tego mięśnia. Natomiast stopniowanie siły mięśnia zachodzi dzięki dwóm mechanizmom: rekrutacji i kodowaniu częstotliwości wyładowań jednostek ruchowych. Stworzone oprogramowanie umożliwia dostosowywanie parametrów pojedynczego skurczu aktywnych jednostek ruchowych dla uzyskania określonej siły skurczu mięśnia. Ponadto, oprogramowanie oszacowując funkcję przystosowania przy użyciu hierarchicznego algorytmu genetycznego dobiera najbardziej optymalne momenty czasowe wyładowań jednostek ruchowych z dostępnych alternatywnych rozwiązań, w celu symulacji określonego skurczu mięśnia.

Umożliwia to określenie udziału różnych jednostek ruchowych w ruchu i porównywanie ich zasymulowanej aktywności elektrycznej z sygnałem elektromiograficznym, uzyskanym podczas skurczów dowolnych mięśni. Dwa lata temu dokonaliśmy pierwszej weryfikacji symulacji pracy jednostek ruchowych u ludzi za pomocą zaproponowanego modelu (*Raikova R., Aladjov H., Łochyński D., Kaczmarek D., 2012, Muscle model composed by motor units and simulation of their control by using hierarchical genetic algorithm. The Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering. ARUP; ISBN: 978-0-9562121-5-3; str. 1030-1035*). Celem badań było określenie kontroli nerwowej u ludzi podczas prostych ruchów zginania kończyny górnej w płaszczyźnie strzałkowej, wykonywanych z różną prędkością. Podstawowym zadaniem było zasymulowanie przy użyciu oprogramowania MotCo udziału różnych jednostek ruchowych w szybkich i wolnych ruchach zgięcia w stawie łokciowym,

używając różnych wzorów obliczeniowych i weryfikując uzyskane parametry. Modelowane były dwa mięśnie – dwugłowy i trójgłowy ramienia. Zgodność otrzymanych sygnałów elektrycznych mięśnia, powstałych na skutek symulacji rekrutacji i kodowania częstotliwości wyładowań jednostek, była weryfikowana na podstawie zmierzonych eksperymentalnie sygnałów elektromiograficznych badanych mięśni podczas ich skurczów dowolnych. Udało nam się z dużą dokładnością przewidzieć znaczącą synchroniczną aktywność obu mięśni antagonistycznych w momencie, gdy doszło do zmian kierunku zewnętrznego momentu stawowego podczas najszybszych ruchów. Zastosowany model mięśnia umożliwił bardziej dogłębną analizę kontroli ruchu i dobrze przewidział uzyskane eksperymentalnie obserwacje. Był on również w stanie określić funkcję przystosowania wyładowań jednostek ruchowych dla całego okresu ruchu, a nie tylko jego odcinka. Ponadto, ponieważ oprogramowanie dostarcza informacji o impulsacji wszystkich jednostek ruchowych, zaangażowanych w skurcz mięśnia, może posłużyć do generowania odpowiednich parametrów funkcjonalnej stymulacji elektrycznej, czy też stymulacji świetlnej w przyszłości.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Badania wykazały, że dzięki zastosowaniu oprogramowania MotCo możliwe było zasymulowanie pracy jednostek ruchowych w celu uzyskania określonego skurczu mięśni dwugłowego i trójgłowego ramienia, podczas prostych ruchów zgięcia w stawie łokciowym wykonywanych z różną prędkością kątową. Model otwiera nowe perspektywy do dalszych badań procesów sterowania skurczem jednostek ruchowych oraz kontroli nerwowo-mięśniowej u ludzi.

Wpływ wibracji całego ciała na metabolizm kostny

Osobne badania, w których brałem udział, miały na celu określenie wpływu wibracji całego ciała na metabolizm tkanki kostnej. Podczas starzenia się organizmu dochodzi do involucji szkieletu. Jest to proces fizjologiczny w znacznej części determinowany przez czynniki genetyczne. Ograniczenie aktywności fizycznej, będące skutkiem mało aktywnego stylu życia współczesnej populacji, zmniejsza obciążenie mechaniczne kości i prowadzi do wzrostu zachorowań na osteoporozę. Znaczna utrata masy kostnej prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości kości na bodźce mechaniczne i może być przyczyną złamań. Tempo przemiany kostnej może być istotnie modyfikowane poprzez wpływy środowiskowe m.in. aktywność fizyczną. Poszukiwanie metod zapobiegających utracie masy kostnej, czy nawet prowadzących do jej odbudowy, ma istotne znaczenie w profilaktyce poważnych uszkodzeń narządu ruchu. Badania wykazały, że bodźce mechaniczne, działające na tkankę kostną, o wysokiej częstotliwości i umiarkowanej sile, jakie występują podczas wibracji całego ciała, mogą istotnie nasilić tempo syntezy tkanki kostnej i zwiększyć wytrzymałość

beleczek kostnych u ludzi i gryzoni, zdrowych lub z osteopenią. Jednak nadal trwa poszukiwanie optymalnych parametrów wibracji, które skutecznie zwiększą gęstość mineralną kości. W naszych badaniach wykonanych na szczurach (Nowak A, **Łochyński D**, Pawlak M, Romanowski W, Krutki P. *High-magnitude whole-body vibration effects on bone resorption in adult rats. Aviation, Space, and Environmental Medicine, w druku*) zastosowaliśmy taki sam protokół wibracji (o wysokiej wartości przyspieszenia – 4,9 G, ale krótkim czasie oddziaływania – 2 min. na dobę), jak w poprzednich badaniach dotyczących tkanki mięśniowej. Naszą intencją było wywołanie częstotliwości rezonansowych w tkankach, które wywołują silną aktywację mięśni, ponieważ znany jest fakt, że skurcz mięśni poprzez naprężenie tkanki kostnej może przyczynić się do zwiększenia syntezy tkanki kostnej. Po 6 miesiącach wibracji znacznie obniżyło się stężenie C-końcowego telopeptydu kolagenu I (CTX, wskaźnik resorpcji kości) w surowicy krwi dorosłych osobników. Spadkowi CTX nie towarzyszyła zmiana w stężeniu ligandu osteoprotegeryny (RANK-L). Stężenie osteokalcyny (OC, wskaźnik formacji kości) nie uległo zmianie, dlatego też istotnie zmalał stosunek OC do CTX. Jednak, mimo wywołanych zmian przemiany tkanki kostnej (zmniejszeniu resorpcji przy utrzymanym poziomie formowania kości) nie odnotowano zmian w gęstości mineralnej kości ocenianej w całym szkielecie. Natomiast nie możemy wykluczyć możliwości wzrostu gęstości mineralnej kości w specyficznych miejscach szkieletu np. w kościach długich kończyn. Zastosowany protokół wibracji mógłby być bardziej skuteczny w przeciwdziałaniu utraty masy kostnej np. u osób starszych, osób z osteoporozą, czy też u osób u których ze względu na panujące warunki zewnętrzne dochodzi do degradacji kośćca np. podczas lotów kosmicznych. Potwierdzenie tych przypuszczeń wymaga dalszych badań.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Badania wykazały, że sześciomiesięczny trening wibracji całego ciała prowadzi do zmniejszenia tempa resorpcji tkanki kostnej.

Różnice w sile izokinetycznej prostowników i zginaczy stawu kolanowego u mężczyzn z uszkodzeniem jednego i obydwu więzadeł krzyżowych

W celu określenia maksymalnej siły izokinetycznej zginaczy i prostowników stawu kolanowego podczas skurczów koncentrycznych, wzajemnego stosunku sił obydwu tych grup mięśniowych oraz symetrii siły mięśni obu kończyn u osób zdrowych oraz chorych z jedno-i wielo-więzadłowym urazem kolana, przeprowadzone zostało badanie przekrojowe. Stopień osłabienia siły prostowników i zginaczy kolana po przerwaniu więzadeł stawu kolanowego wpływa na efekty rehabilitacji oraz na zdolność odzyskiwania funkcji ruchowych i na jego podstawie można prognozować ryzyko rozwoju choroby zwyrodnieniowej stawu kolanowego. Trzy grupy rekreacyjnie aktywnych mężczyzn: zdrowi, z uszkodzeniem

więzadła krzyżowego przedniego (ACLI) oraz z uszkodzeniem więzadła krzyżowego przedniego i tylnego (APCLI), zostały dopasowane do siebie pod względem wieku, masy ciała i wysokości ciała. Podczas ruchów zgięcia i wyprostu w stawie kolanowym z niższą ($60^\circ / s$) i wyższą ($240^\circ / s$) prędkością oceniano maksymalny koncentryczny moment siły mięśni w stosunku do masy ciała (PT / BM), całkowitą pracę (TW), wskaźnik symetrii siły mięśni obu kończyn dolnych dla PT i TW (LSI), oraz stosunek maksymalnego momentu zginaczy do prostowników. Głównym odkryciem było to, że w porównaniu do osób z ACLI, pacjenci z APCLI mieli niższą średnią TW (prostowniki: 30,3%, zginacze: 28,2%) i niższą średnią LSI TW (prostowniki: 74% u APCLI wobec 91,6% u ACLI; zginacze: 61,3% u APCLI wobec 90,8% u ACLI) przy wyższej prędkości testowania izokinetycznego. Jednakże przy mniejszej prędkości wielkość ubytku PT / BM i TW w stosunku do osobników zdrowych była większa u osób z APCLI niż ACLI.

ELEMENTY NOWATORSKIE LUB ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA AUTORA:

Badania wykazały, że po zerwaniu obu więzadeł krzyżowych zdolność generowania maksymalnego momentu siły, poprzez koncentryczne skurcze mięśni podczas ruchów zgięcia i wyprostu w stawie kolanowym wykonywanych z wysoką prędkością, jest niższa w kończynie uszkodzonej niż po zerwaniu więzadła krzyżowego przedniego.

5.3. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE

Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania: 24,519

Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS): 35

Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS): 4

Krajowe nagrody za działalność naukową albo artystyczną

Brażowy medal im. Jędrzej Śniadeckiego, nagroda Rektora Akademii Wychowania Fizycznego za pracę doktorską pt. Wpływ starzenia się organizmu na regulację siły skurczu jednostek ruchowych w modelu zwierzęcym.

Inne nagrody i wyróżnienia

1. Rozprawa doktorska pt. Wpływ starzenia się organizmu na regulację siły skurczu jednostek ruchowych w modelu zwierzęcym została wyróżniona Uchwałą Rady Wydziału Wychowania Fizycznego Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu.
2. Stypendium przyznane przez Federation of European Neuroscience Society w ramach konkursu kwalifikującego do uczestnictwa w szkole z dziedziny neuronauk: "Mechanotransduction and nociception", 21-26 Sierpień, 2007, Bukareszt, Rumunia.
3. W 2009 r. praca z moim współautorstwem pt. Związek między wydolnością funkcjonalną stóp i stabilnością posturalną u młodzieży z bocznym skrzywieniem kręgosłupa została wyróżniona przez Komitet Naukowy na I Międzynarodowym Kongresie "Rehabilitacja Polska" odbywającym się w Warszawie.

Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych

1. Polskie Towarzystwo Badań Układu Nerwowego, 8 lat (od 2006), członek.
2. International Brain Research Organization, 8 lat (od 2006), członek.
3. Federation of European Neurosciences, 8 lat (od 2006), członek.

Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich

1. Wolfson Centre for Age Related Diseases, Neurorestoration laboratory, King's College London, Londyn, Wielka Brytania, 07. 2008.
2. Centre of Biomedical Engineering, Bulgarian Academy of Science, Sofia, Bulgaria, 2005-2012, 5 krótkoterminowych (tygodniowe) wizyt naukowych w celu realizacji wspólnych projektów w ramach współpracy Polskiej i Bułgarskiej Akademii Nauk.

Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych

1. Journal of Biomechanics, od 2009 – 1;
2. Journal of Motor Behaviour, od 2013 – 1;
3. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, od 2014 – 1.

Udział w międzynarodowych i krajowych projektach badawczych

Krajowe:

1. Sumowanie sił skurczów jednostek ruchowych w regulacji przebiegu skurczu mięśni, grant MNSW, 2 P05D 029 27, 148 000 PLN, 2004-2007 r., wykonawca;
2. Wpływ starzenia się na regulację siły skurczu jednostek ruchowych, grant promotorski, MNI, 2 P05D 109 29, 15 600 PLN, 2005-2006 r., główny wykonawca;
3. Znaczenie kodu nerwowego w programowaniu ruchu, grant MNSW, N N404 027035, 239 600 PLN, 2008-2011 r., wykonawca;
4. Ocena skuteczności treningu neurosensorycznego w niestabilności złożonej stawu kolanowego, grant KBN, NN 404 155 334, 68 840 PLN, 2008-2011 r., wykonawca;
5. Diagnostyka zaburzeń postawy ciała u dzieci - profilaktyka i postępowanie korekcyjne, grant NCBR, VI konkurs na projekty rozwojowe, NR 13 0070 06, 2009-2012 r., 1 253 360 000 PLN, wykonawca;
6. Fizjologiczne i biochemiczne aspekty wpływu treningu wibracyjnego na układ ruchu, grant MNSW, N N404 04 21 36, 263 000 PLN, 2009-2011 r., główny wykonawca;
7. Wpływ przewlekłego przeciążenia mięśnia na cechy motoneuronów i jednostek ruchowych, grant NCN, OPUS, M NZ4 00190, 2012-2015 r., 288 000 PLN, wykonawca;
8. Wpływ treningu wytrzymałościowego na cechy skurczu jednostek ruchowych w relacji do zmian w ekspresji białek mięśniowych, grant NCN, OPUS, 2013/09/B/NZ7/02555, 447 580 PLN, 2014-2016 r., wykonawca;
9. Wpływ suplementacji beta-alaniny na cechy skurczu jednostek motorycznych oraz wybrane wskaźniki biochemiczne u młodych i starych szczurów, grant NCN, OPUS, 2013/09/B/NZ7/02554, 324 400 PLN, 2014-2017 r., wykonawca;
10. Plastyczność jednostek ruchowych pod wpływem treningu siłowego, grant NCN, OPUS, 2013/11/B/NZ7/01518, 293 240 PLN, 2014-2017 r., główny wykonawca.

Międzynarodowe:

1. Summation of muscle contractions in an unfused tetanus, polsko-bułgarski projekt badawczy współpracy naukowej PAN i BAN, 2004-2005 r., wykonawca;
2. Experimental investigation and modeling of individual contractions of motor units and their summation into tetanus, polsko-bułgarski projekt badawczy współpracy naukowej PAN i BAN, 2006-2008 r., wykonawca;

3. Experimental and modeling investigation of forces developed by motor units, polsko-bułgarski projekt badawczy współpracy naukowej PAN i BAN, 2009-2011 r., wykonawca;
4. Muscle model composed of motor units and software for simulation of their control by means of hierarchical genetic algorithm, polsko-bułgarski projekt badawczy współpracy naukowej PAN i BAN, 2010-2012 r., wykonawca;
5. Badania eksperymentalne i modelowanie ruchów kończyny górnej w normie i patologii przy użyciu elektromiografii powierzchniowej i oprogramowania MOTCO, polsko-bułgarski projekt badawczy współpracy naukowej PAN i BAN, 2012-2014 r., wykonawca;
6. Wpływ suplementacji beta-alaniny na stężenie karnozyny w mięśniach szkieletowych oraz siłę jednostek motorycznych na modelu szczura, polsko-belgijski projekt badawczy współpracy naukowej PAN i BAN, 2013-2015 r., wykonawca.

Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych

11th International Congress of the Polish Neuroscience Society (Polskiego Towarzystwa Badań Układu Nerwowego), 2013, Poznań, Polska, organizator sesji plakatowych kongresu.

Projekty autorskie

W latach 2008-2014 zaprojektowałem aparat do badań parametrów mechanicznych oraz aktywności elektrycznej mięśni zginaczy i prostowników stawu łokciowego u ludzi. Wymienione urządzenie może być dostosowywane do różnych rozmiarów ciała i zintegrowane z komercyjnie dostępnymi czujnikami elektronicznymi (potencjometrami i dynamometrami). Aparat został wykonany przez polskich przedsiębiorców i będzie wykorzystywany do badań kontroli nerwowo-mięśniowej i integracji czuciowo-ruchowej.

Ukończone szkolenia

1. W 2008 r. ukończyłem szkolenie z zakresu metod statystycznych stosowanych w nauce i obsługi programu Statistica przeprowadzone na Akademii Wychowania Fizycznego w Poznaniu.

