

mgr inż. PAWEŁ BARTUZI
dr hab. inż. DANUTA ROMAN-LIU
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Ocena obciążenia i zmęczenia układu mięśniowo-szkieletowego z zastosowaniem elektromiografii

Wprowadzenie

Dolegliwości układu mięśniowo-szkieletowego są jedną z najpowszechniejszych przyczyn orzeczeń ustalających niezdolność do pracy (rys. 1.). W latach 2003-2005 dolegliwości te były przyczyną ponad 16% orzeczeń pierwszorazowych stwierdzających częściową niezdolność do pracy oraz 5% orzeczeń ustalających całkowitą niezdolność do pracy. Prawie 24% pracowników z państw Unii Europejskiej (UE-25) skarży się na bóle kręgosłupa, a 22% na bóle mięśniowe [1]. W Polsce w 2004 roku przewlekłe choroby układu ruchu były przyczyną 2,5% wszystkich chorób zawodowych [2]. Dolegliwości mięśniowo-szkieletowe są przyczyną cierpienia fizycznego i utraty dochodów pracowników.

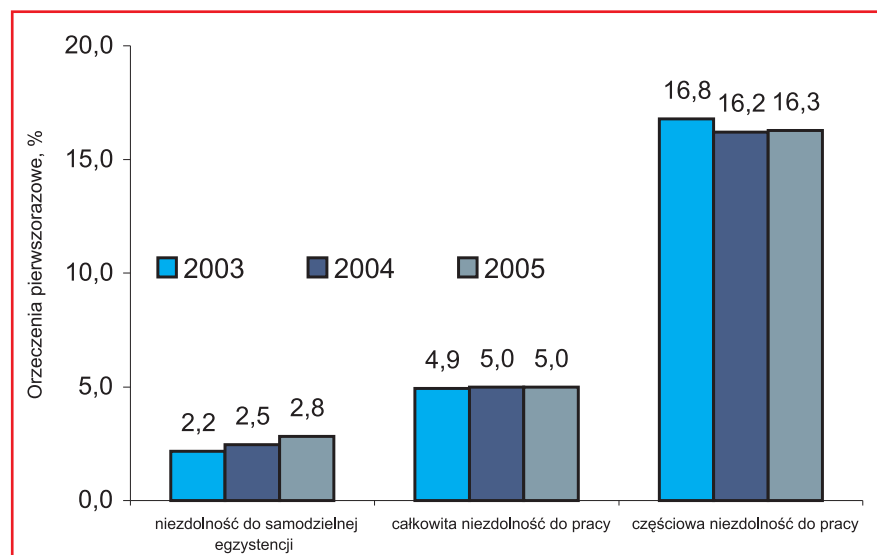
Liczne badania wykazały bezpośredni związek między dolegliwościami układu mięśniowo-szkieletowego a obciążeniem i zmęczeniem mięśniowym, rozwijającym się na skutek wykonywania pracy zawodowej.

Obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego pracownika może być oceniane jako obciążenie zewnętrzne, związane ze statycznym i dynamicznym wysiłkiem fizycznym (np. przy dźwiganiu), bądź jako obciążenie wewnętrzne, będące reakcją organizmu na powstające obciążenie zewnętrzne. Obciążenie zewnętrzne oceniane jest z wykorzystaniem różnych metod jak np. OWAS (*Ovako Working Posture Analysis System*) [3] czy OCRA (*Occupational Repetitive Actions*) [4]. W metodach tych obciążenie oceniane jest na podstawie parametrów opisujących położenie poszczególnych członów ciała, siły wywieranej przez pracownika oraz sekwencji czasowych obciążenia. Obciążenie wewnętrzne i zmęczenie pracownika może być

Elektromiografia (EMG) jest nieinwazyjną metodą oceny obciążenia i zmęczenia układu mięśniowo-szkieletowego, polegającą na rejestracji czynności elektrycznej mięśni. Artykuł ma na celu przybliżenie czytelnikowi tej metody badawczej jako niezbędnej do oceny obciążenia pracownika w kontekście wykonywanej pracy. W artykule omówiono właściwości i specyfikę pomiaru sygnału EMG, podano podstawowe informacje dotyczące aparatury badawczej niezbędnej do przeprowadzenia pomiarów z wykorzystaniem elektromiografii oraz przedstawiono sposób analizy mającej na celu ocenę obciążenia i zmęczenia mięśniowego, powstającego np. w wyniku wykonywania czynności pracy.

Assessment of musculoskeletal load and fatigue with electromyography

Electromyography (EMG) is non-invasive method of assessment of musculoskeletal load and fatigue. It is based on recording muscle electrical activity. The aim of this article is to explain that this research method is essential in assessing employees' load in the context of the work they perform. This article presents methods of measuring the EMG signal and information about equipment necessary in EMG recordings. Analysis aimed at assessing muscle load and fatigue generated, e.g., as a result of a work activity was also discussed.



Rys. 1. Orzeczenia pierwszorazowe ustalające niezdolność do pracy z powodu dolegliwości układu mięśniowo-szkieletowego w stosunku do wszystkich orzeczeń pierwszorazowych

Fig. 1. First judgments establishing incapacity for work due to musculoskeletal disorders in relation to all first judgments

oceniane z zastosowaniem takich metod jak analiza ciśnienia krwi, wydatku energetycznego czy też analiza sygnału elektrycznego charakteryzującego skurcz mięśnia. Od kilkunastu lat dynamicznie rozwijającą się metodą oceny obciążenia i zmęczenia mięśniowego jest analiza elektromiogramu (EMG), rejestrowanego z wybranych mięśni, zaangażowanych w wykonywanie czynności pracy. Elektromiografia jest więc metodą opierającą się na rejestracji czynności elektrycznej mięśni, umożliwiającą nieinwazyjny i łatwy do przeprowadzenia na stanowisku pracy pomiar.

Zmęczenie mięśniowe

Zmęczenie mięśniowe powstaje na skutek procesów zmieniających możliwości mięśnia do utrzymania określonego poziomu siły lub statycznej pozycji ciała i jest definiowane jako spadek możliwości generowania siły w wyniku wzrastającego odczuwania wysiłku. Zachodzące pod wpływem zmęczenia mięśnia zmiany widoczne są w zapisie elektromiogramu poprzez zmianę wartości parametrów sygnału EMG. Proces zmęczenia mięśni powoduje wzrost amplitudy sygnału EMG oraz przesunięcie widma mocy w kierunku niskich częstotliwości, co uwidacznia się w zmianie wartości parametrów sygnału EMG (rys. 2).

Zmęczenie mięśniowe nie jest jedyną przyczyną zmian wartości parametrów sygnału EMG, jego amplituda zmienia się wraz ze zmianą siły mięśnia. Liczne badania wykazały, że pod wpływem zmian siły mięśniowej zmieniają się również wartości częstotliwości średniej (MPF),

częstotliwości medialnej (MF) i parametru określającego liczbę przejść sygnału EMG przez poziom zerowy w jednostce czasu (ZC). Innym powodem zmian w wartościach parametrów sygnału EMG może być regeneracja mięśnia po wysiłku, która powoduje spadek amplitudy średniokwadratowej (RMS) i wzrost wartości parametru MPF. Przyjmuje się, iż zmęczenie mięśnia widoczne jest w zapisie sygnału EMG tylko wówczas, gdy występuje zarówno spadek parametru MF lub MPF jak i wzrost amplitudy sygnału EMG [6].

Spośród licznych badań, których celem była analiza zmian wartości parametrów sygnału EMG pod wpływem obciążenia zewnętrznego, nie wszystkie opisywały zmiany analizowanego parametru w sposób ilościowy, a jedynie wskazywały na tendencje zmian. W badaniach, w których zmiany opisywano przez równanie funkcji regresji, w większości przypadków przyjęto, że zmiana parametru w czasie odpowiada zależności liniowej – a jako wskaźnik zmęczenia przyjmowano współczynnik pochylenia prostej lub zmianę wartości parametru w jednostce czasu. Jednakże w wielu przypadkach zmiany parametrów sygnału EMG w czasie, bardziej odpowiadały krzywej eksponentialnej lub logarytmicznej niż zależności liniowej.

W równaniu funkcji regresji opisującym zmianę wartości parametru sygnału EMG w czasie duże znaczenie ma czas do zmęczenia mięśnia. Przy uwzględnieniu różnego czasu zmęczenia można otrzymać różną postać równania funkcji regresji. W badaniach zmęczenia

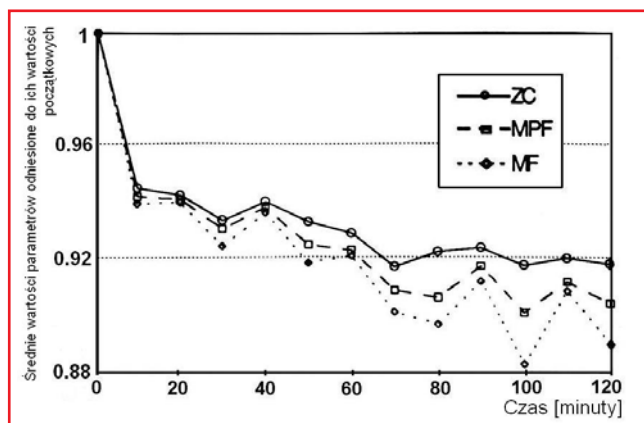
mięśni jako czas trwania obciążenia przyjmuje się subiektywnie przez osoby badane określony maksymalny czas utrzymywania obciążenia, bądź też czas trwania obciążenia narzucony, jednakowy dla wszystkich osób badanych.

Narzucony warunkami eksperymentu czas badania nie uwzględnia indywidualnych cech osób badanych i może być zbyt krótki lub zbyt długi w stosunku do zmęczenia mięśnia. Natomiast subiektywnie przez badanych określony maksymalny czas utrzymywania obciążenia dotyczy zmęczenia całościowego odnoszącego się do całego członu ciała a nie do mięśnia, z którego rejestrowany jest sygnał EMG. Dodatkowo na maksymalny czas utrzymywania obciążenia mają wpływ także czynniki, które nie zależą od zmęczenia, jak wrażliwość na odczuwanie bólu czy motywacja.

EMG a siła mięśniowa

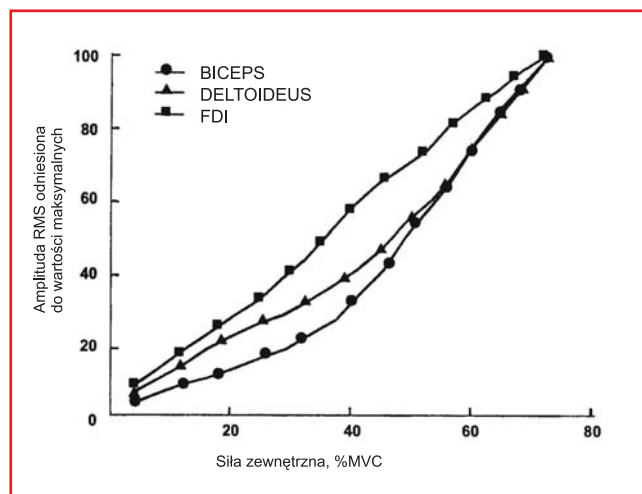
Elektromiografia z wykorzystaniem elektrod powierzchniowych jest jedyną nieinwazyjną metodą pozwalającą na oszacowanie siły rozwijanej przez dany mięsień, w niektórych wystarczająco dużych i ułożonych bezpośrednio pod skórą mięśniach lub grupach mięśni. Badania dowiodły, że siła mięśnia jest proporcjonalna do amplitudy odpowiednio przetworzonego sygnału EMG [7].

Korelacja pomiędzy amplitudą sygnału EMG a wyrażaną w %MVC (maksymalnego napięcia mięśniowego), siłą rozwijaną w czasie skurczu mięśni została wykazana w wielu badaniach. Ze względu na to, że jednym z najważniejszych czynników wpływających na zależność między



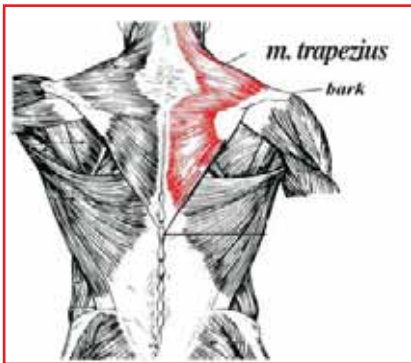
Rys. 2. Średnie, odniesione do wartości początkowych, wartości parametrów MF, MPF i ZC sygnału EMG zarejestrowanego podczas 6-sekundowych testów na poziomie 15% MVC (maksymalnego napięcia mięśniowego) z 10-minutowym interwałem czasowym w trakcie wykonywania czynności pracy (mięśnie: czworoboczny i podgrzebieniowy) [5]

Fig. 2. Averages, standardized to initial values of parameters MF, MPF and ZC of the EMG signal recorded during 6-s tests at the level of 15% MVC (maximal voluntary contraction) at 10-min intervals during work activity (m. trapezius and m. infraspinatus) [5]

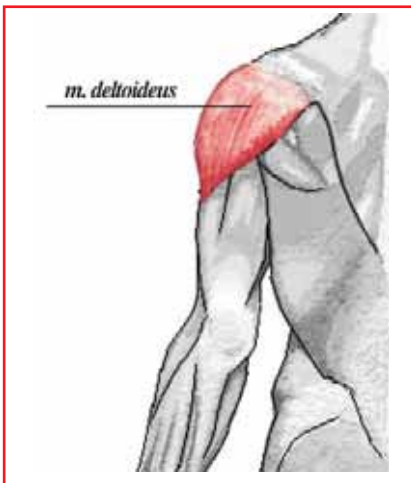


Rys. 3. Zależność między amplitudą sygnału EMG a siłą mięśnia dla trzech mięśni kończyny górnej [8]

Fig. 3. The relationship between EMG amplitude and muscle force for three muscles of the upper limb [8]



Rys. 4. Mięsień czworoboczny
Fig. 4. *M. trapezius*



Rys. 5. Mięsień naramienny
Fig. 5. *M. deltoideus*

tymi miarami jest rodzaj włókien z jakich zbudowany jest dany mięsień, dla różnych mięśni zależność ta ma różną postać (rys. 3.). Siła, jaką mięsień rozwija i w związku z tym napięcie elektryczne mięśnia wyrażone poprzez amplitudę sygnału EMG zależy także od długości mięśnia, czyli od położenia poszczególnych członów ciała.

Badania z użyciem elektromiografii umożliwiają określenie funkcji np. głównych mięśni ramienia i obręczy barkowej w zależności od czynności wykonywanych za pomocą kończyn górnych. Wyniki badań wskazują, iż główną rolę części zstępującej mięśnia czworobocznego (*m. trapezius pars descendens*) jest utrzymywanie kończyny górnej w określonym położeniu (rys. 4.).

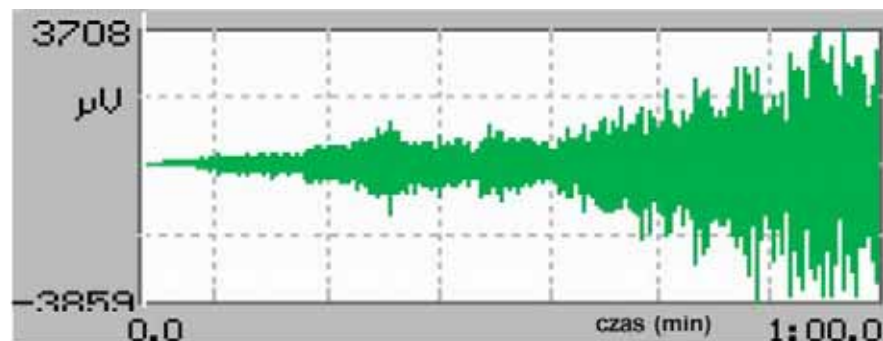
Badania wykazały, że również wykonywanie czynności powodujących zaangażowanie tylko przedramienia i ręki, a w szczególności wykonywanie czynności precyzyjnych ma wpływ na aktywność mięśni barku. Szczególnie istotnym mięśniem, obok mięśnia czworobocznego, zaangażowanym w utrzymywanie kończyny górnej, jest mięsień naramienny (*m. deltoideus*, rys. 5.).

Właściwości i pomiar sygnału EMG

Ruch i generacja siły mięśniowej związane są ze skurczem mięśnia, który zachodzi pod wpływem impulsów dochodzących z układu nerwowego [9]. Na skutek skurczu w mięśniu zachodzą zjawiska elektryczne, związane ze wzrostem lub spadkiem napięcia mięśniowego, które mogą być rejestrowane za pomocą elektromiografu. Sygnał EMG wyraża więc czynność elektryczną mięśnia związaną z jego skurczem i generowaniem siły.

Sygnał EMG ma charakter stochastyczny i zawarty jest w paśmie częstotliwości około 5÷1000 Hz. Przyjmuje się jednak, że górna wartość graniczna wynosi 450 Hz (powyżej 450 Hz składowe harmoniczne są zaniedbywalne). Kolejnym, poza częstotliwością, parametrem charakteryzującym sygnał EMG jest jego amplituda, która zawiera się w granicach od kilku μV w stanie spoczynku do kilkudziesięciu mV podczas maksymalnego napięcia mięśniowego. Częstotliwość i amplituda rejestrowanego sygnału EMG zależą od rodzaju włókien mięśniowych, częstości skurczów oraz rozwijanej siły.

Sygnał EMG jest źródłem wielu informacji dotyczących procesów zachodzących w mięśniu, w tym obciążenia i zmęczenia mięśnia. Jednakże nieprzetworzony sygnał EMG niesie ze sobą tylko informację jakościową, za pomocą której można stwierdzić, czy mięsień jest aktywny i czy generuje siłę. Na rysunku 6. przedstawiono przebieg nieprzetworzonego sygnału EMG zarejestrowanego w ciągu 1 minuty. Widoczny jest wyraźny wzrost amplitudy sygnału wynikający ze wzrostu siły mięśnia. Na podstawie zapisu nieprzetworzonego sygnału EMG, możliwa jest jedynie ocena jakościowa wskazująca czy mięsień pracuje z większą czy mniejszą siłą. Aby uzyskać informację ilościową należy dokonać obróbki matematycznej sygnału. Na jej podstawie można wyodrębnić parametry charakteryzujące sygnał EMG, które wskazują na procesy zachodzące w mięśniu.



Rys. 6. Przebieg nieprzetworzonego sygnału EMG
Fig. 6. A chart of a raw EMG signal

Sygnał elektromiograficzny może być rejestrowany z mięśnia przy użyciu wkłuwanych elektrod igłowych lub elektrod powierzchniowych (rys. 7.). Elektrody igłowe stosowane są w diagnostyce chorób mięśni. W biomechanice pracy i sportu w większości przypadków stosuje się elektrody, które zbierają sygnał z powierzchni skóry (elektrody powierzchniowe), dzięki czemu możliwy jest nieinwazyjny pomiar sygnału EMG. Elektromiografia powierzchniowa jest bardzo przydatnym narzędziem analizy sygnału EMG, szczególnie w przypadku pomiarów sygnału z mięśni znajdujących się tuż pod skórą oraz mięśni stosunkowo dużych, umożliwiających łatwe umieszczenie elektrod badawczych.

W celu zarejestrowania sygnału z jednego mięśnia, stosuje się trzy elektrody (rys. 8.). Dwie z nich są to elektrody czynne, umieszczone wzdłuż włókien mięśniowych na brzuscu mięśnia, w stałej odległości od siebie, natomiast trzecia stanowi elektrodę odniesienia. Przed przystąpieniem do zapisu sygnału EMG z mięśnia, należy odpowiednio przygotować skórę (ogolić, jeśli to konieczne, oczyścić za pomocą alkoholu), tak by uzyskać rezystancję między skórą a elektrodą poniżej 2 k Ω .

Aparatura badawcza

Do przeprowadzenia analizy elektromiograficznej, umożliwiającej np. ocenę stanowiska pracy, niezbędna jest odpowiednia aparatura badawcza. Urządzeniami umożliwiającymi pomiar sygnału EMG dysponują instytucje zajmujące się biomechaniką pracy i sportu.

Rozwój techniki ma swój wpływ również na rozwój aparatury badawczej stosowanej w elektromiografii powierzchniowej. Na rynku dostępne są aparaty umożliwiające pomiar i zapis sygnału EMG, w którym stosuje się coraz nowsze rozwiązania techniczne. Urządzenia te umożliwiają obserwację i rejestrację sygnału nieprzetworzonego, a także późniejszą analizę sygnału zgodnie z najnowocześniejszymi

procedurami analizy obciążenia i zmęczenia mięśniowego.

Dostępne na rynku aparaty pomiarowe w połączeniu z komputerem umożliwiają obserwację i rejestrację nieprzetworzonego sygnału oraz jego późniejszą analizę. Najważniejszymi parametrami charakteryzującymi aparaty pomiarowe sygnału EMG są: impedancja wejściowa, tłumienie szumów (CMRR), wzmocnienie, częstotliwość próbkowania, pasmo przenoszenia oraz liczba analizowanych kanałów.

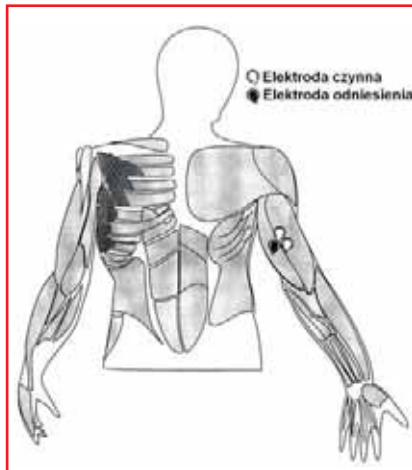
Obecnie stosowane urządzenia mają nawet 16 kanałów, co oznacza, że istnieje możliwość zapisu i analizy sygnału EMG z 16 mięśni jednocześnie. Na rynku można znaleźć także przenośne aparaty pomiarowe, umożliwiające zdalny przesył danych do stacji bazowej na odległość do 100 metrów, co jest bardzo przydatne podczas badań wymagających przemieszczania się osób badanych. Pojedynczy przenośny moduł umożliwia pomiar oraz przesył sygnału z 8 kanałów jednocześnie. Przenośny moduł umożliwia także przesył sygnału EMG bezpośrednio do komputera wyposażonego w odpowiednią kartę.

Utrudnienia związane z oceną zmęczenia mięśniowego

Analiza sygnału EMG, szczególnie w odniesieniu do zmęczenia mięśniowego, wiąże się z pewnymi ograniczeniami. W celu przeprowadzenia analizy spektralnej sygnału EMG konieczna jest rejestracja podczas izometrycznego napięcia mięśni. W przypadku analizy zmęczenia przy zmiennym poziomie wywieranej siły lub zmiennym położeniu kończyny górnej zapewnienie takich warunków pomiaru jest szczególnie trudne. Oznacza to, że skutki obciążenia powtarzalnego są znacznie bardziej trudne do zbadania niż skutki obciążenia statycznego. Ze względu na to większość prac wykazujących zmiany parametrów sygnału EMG



Rys. 7. Umieszczanie elektrod powierzchniowych nad badanym mięśniem (mięsień prostownik grzbietu)
Fig. 7. Sticking surface electrodes over the investigated muscle (m. erector spinae)



Rys. 8. Typowy sposób naklejania elektrod powierzchniowych nad badanym mięśniem (mięsień dwugłowy ramienia)
Fig. 8. A typical way of sticking surface electrodes over the investigated muscle (m. biceps brachii)

w czasie, pod wpływem zmęczenia mięśni, koncentruje się na obciążeniach ciągłych.

Innym istotnym problemem pojawiającym się w analizie sygnału EMG jest fakt, że sygnał ten, rejestrowany za pomocą elektrod powierzchniowych z określonego mięśnia, zależy nie tylko od liczby aktywnych jednostek motorycznych, czyli zespołów komórek mięśni pobudzanych do skurczu, od amplitudy i czasu trwania wyładowania jednostek motorycznych, ale również od wpływu sygnałów z innego mięśnia. Dzieje się tak dlatego, że sygnał pochodzi nie tylko z mięśnia, nad którym elektroda jest naklejana na skórze, ale również z mięśni będących w jego otoczeniu. Zjawisko to, nazywane przesłuchem, jest obecnie najistotniejszym problemem związanym z analizą sygnału EMG rejestrowanego za pomocą elektrod powierzchniowych. Dotychczas nie rozwiązano wszystkich problemów związanych z pomiarem i analizą sygnału EMG [7]. Pozostało jeszcze wiele niezbadanych zagadnień natury technicznej i biomedycznej. Jednak rozwój techniki rejestracji sygnału (np. dzięki zastosowaniu przedwzmacniaczy tuż przy elektrodach) pozwala na znaczną redukcję udziału zakłóceń w zarejestrowanym sygnale EMG.

Podsumowanie

Analiza oraz dokładne poznanie procesów związanych ze zmęczeniem mięśniowym ma duże znaczenie ze względu na możliwość wykorzystania tej wiedzy podczas oceny i projektowania stanowisk pracy. Ocena stanowisk pracy, zarówno na etapie ich projektowania,

jak i późniejszego użytkowania, umożliwia określenie optymalnych warunków obciążenia, czyli takich, które będą minimalizować zmęczenie mięśniowe. Taka wiedza pozwala na dostosowanie i modyfikację stanowisk pracy, tak aby zminimalizować wpływ zmęczenia mięśniowego. Badania z wykorzystaniem elektromiografii powierzchniowej umożliwiają między innymi przeprowadzenie analizy zmęczenia mięśniowego na stanowisku pracy, na którym przez długi czas utrzymywana jest statyczna pozycja siedząca (np. stanowisko komputerowe) oraz ocenę obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego w warunkach dynamicznych. Elektromiografia znajduje także zastosowanie w sporcie, pozwalając na uzyskanie parametrów biomechanicznych potrzebnych np. do oceny techniki ruchu sportowca. Wyniki badań dotyczących biomechaniki sportu, przez odpowiednie wpojenie nowych zadań ruchowych, umożliwiają zwiększenie efektywności procesu nauczania początkujących sportowców.

PIŚMIENNICTWO

[1] Broszury informacyjne europejskiej kampanii na rzecz przeciwdziałania zaburzeniom mięśniowo-szkieletowym *Mniej dźwigaj* (<http://ew2007.osha.europa.eu>)
[2] N. Szeszenia-Dąbrowska *Choroby zawodowe w Polsce w 2004 r.* Instytut Medycyny Pracy, Łódź 2005
[3] O. Karhu, P. Kansi, I. Kuorinka *Correcting working postures in industry: A practical method for analysis.* Applied Ergonomics, 8(1977), p. 199-201
[4] D. Colombini *An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs.* Ergonomics, 41(1998), p.1261-89
[5] M. Goran Hagg *Interpretation of EMG spectral alterations and alteration indexes at sustained contraction.* Journal of Applied Physiology, 73(1992), p. 1211-1217
[6] D. A. Winter *Biomechanics of human movement.* University of Waterloo 1979
[7] D. Roman-Liu *Analiza biomechaniczna pracy powtarzalnej.* Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2003
[8] C. J. DeLuca *The use of electromyography in biomechanics.* Journal of Applied Biomechanics, 13(1997), p.135-163
[9] J.W. Błaszczyk *Biomechanika kliniczna.* Wydawnictwo Lekarskie PZWL. Warszawa 2004

Publikacja opracowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach programu wieloletniego pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej”, dofinansowywanego w latach 2005-2007 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy