



prof. dr hab. inż. DANUTA ROMAN-LIU (ORCID: 0000-0001-7836-8516)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: daliu@ciop.pl

DOI: 10.54215/BP.2024.3.6.Roman-Liu

Obciążenie zewnętrzne i wewnętrzne w kontekście metod oceny obciążenia mięśniowo-szkieletowego

Fot. Shidlovski/Bigstockphoto



W artykule przedstawiono koncepcję zależności między obciążeniem określanym jako zewnętrzne a obciążeniem wewnętrznym, określanym jako reakcja organizmu pracownika na to oddziaływanie, w powiązaniu z metodami oceny obciążenia. Scharakteryzowano metody służące do oceny oddziaływania wynikającego tylko z wykonywanych czynności pracy (metody oceny obciążenia zewnętrznego) oraz takie, które uwzględniają cechy indywidualne pracownika (metody oceny obciążenia wewnętrznego). Szczególną uwagę poświęcono zmiennym wejściowym do metod oceny obciążenia zewnętrznego, odnoszącym się do pozycji ciała (kąty w stawach) i wywieranych sił. W zaprezentowanej analizie omówiono różnice i podobieństwa występujące w obydwu typach metod.

Słowa kluczowe: oddziaływanie, kąty pozycji ciała, siła względna, możliwości siłowe, czynności pracy

External and internal load in the context of methods for assessing musculoskeletal load

The article presents the concept of the relationship between the load defined as external and the internal load, defined as the reaction of the employee's body to this impact. Methods for assessing the impact resulting only from work activities (methods for assessing external load) and those that take into account the individual characteristics of the employee (methods for assessing internal load) have been characterized. Particular attention was paid to the input variables to the external load assessment methods relating to the body position (joint angles) and the forces exerted. The presented analysis discusses the differences and similarities in both types of methods.

Keywords: exposure, body posture angles, relative force, force exertion capabilities, work tasks

Wstęp

Dolegliwości mięśniowo-szkieletowe (MSDs) od wielu lat stanowią główne zagrożenie dla zdrowia pracowników. Powszechnie za MSDs przyjmuje się wszelkie zaburzenia układu ruchu – dotyczące mięśni, nerwy, ścięgna, więzadła, stawy, worki maziowe, chrząstki, powięź i krążki międzykręgowe – które prowadzą do upośledzenia jego funkcji. Rozwój MSDs powiązany jest z czynnikami ryzyka, które można podzielić na trzy kategorie [1]:

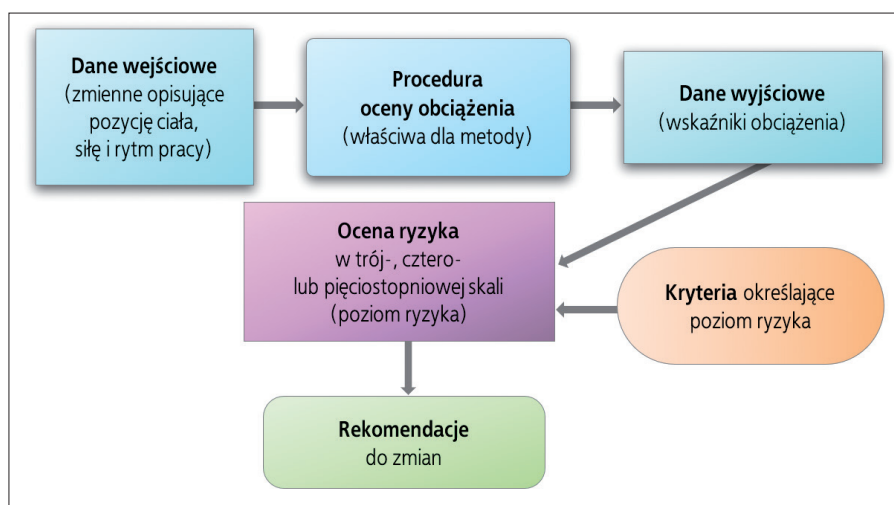
- fizyczne lub biomechaniczne związane z aktywnością fizyczną,
- psychospołeczne (np. wysokie wymagania, niska kontrola i słabe wsparcie społeczne),
- indywidualne (np. wiek, płeć, dochód, wykształcenie).

Zależności między indywidualnymi, psychospołecznymi i biomechanicznymi czynnikami rozwoju MSDs zostały wykazane zarówno przy osobnym występowaniu czynnika, jak i poprzez ich interakcje [2].

Jeśli MSDs występują w miejscu pracy, definiuje się je jako związane z pracą zaburzenia układu mięśniowo-szkieletowego (WMSDs) [3, 4]. Stanowią one jedną z najbardziej rozpowszechnionych chorób powiązanych z wykonywaną pracą, powodując koszty zarówno dla pracowników, jak i pracodawców [5]. Źródłem WMSDs są zbyt duże wymagania związane z pracą w stosunku do możliwości psychofizycznych pracownika, takich jak wydolność organizmu czy siła fizyczna. Powszechnie przyjmuje się, że wśród czynników powiązanych z pracą w rozwoju WMSDs istotne są przede wszystkim czynniki biomechaniczne [6]. Dodatkowo czynniki psychospołeczne mogą pogłębiać tego rodzaju problemy [7, 8].

Czynniki biomechaniczne zależą od rozpatrywanych łącznie zmiennych opisujących pozycję ciała i siłę w powiązaniu z czasem ich oddziaływania. Oddziaływanie czynników wpływających na obciążenie mięśniowo-szkieletowe w krótkim czasie (np. podczas jednego dnia) może być określone jako oddziaływanie całkowite dnia pracy i traktowane jako oddziaływanie krótkookresowe. Oddziaływanie w dłuższym czasie, na który składa się zsumowany czas oddziaływania krótkookresowego, jest określane jako długookresowe. Ze względu na to, że rozwój WMSDs jest powiązany z krótko- i długookresowym oddziaływaniem wynikającym z czynności wykonywanych na stanowisku pracy, określenie optymalnego poziomu obciążenia ma bardzo duże znaczenie. Ponieważ czynniki biomechaniczne odgrywają zasadniczą rolę w rozwoju WMSDs, a wpływ czynników psychospołecznych jest stosunkowo mało udokumentowany, to w dalszej części artykułu rozpatrywano tylko obciążenie spowodowane występowaniem czynników biomechanicznych.

Celem artykułu jest przedstawienie zależności między obciążeniem określanym jako zewnętrzne a obciążeniem wewnętrznym,



Rys. 1. Kroki oceny ryzyka w metodach oceny obciążenia i ryzyka rozwoju dolegliwości mięśniowo-szkieletowych (źródło własne)

Fig. 1. Steps of risk assessment in methods dedicated to assessment of load and risk of developing musculoskeletal disorders (own source)

określanym jako reakcja organizmu pracownika na oddziaływanie, wraz z charakterystyką zmiennych mających zasadniczy wpływ na oddziaływanie i uwzględnianych w różny sposób w metodach oceny ryzyka rozwoju dolegliwości mięśniowo-szkieletowych.

Zależności między oddziaływaniem a reakcją

W bardzo dużym uproszczeniu jako struktury wewnętrzne ciała człowieka można wyodrębnić trzy układy połączone ze sobą poprzez przesyłanie informacji i bodźców oraz dostarczanie substancji energetycznych. Są to: układ ruchu, układ zasilania i układ sterowania [9]. Układ ruchu (szkielet i mięśnie) umożliwia przyjmowanie i utrzymywanie pozycji ciała oraz wywieranie przez pracownika sił powiązanych z procesem pracy. Szkielet jest złożonym biomechanizmem zbudowanym z tkanki kostnej, chrzęstnej i łącznej. Tworzące szkielet kości są ze sobą połączone poprzez stawy, umożliwiające przemieszczanie się kości względem siebie pod wpływem skurczu mięśni szkieletowych. Energia potrzebna do skurczu mięśni jest dostarczana przez układ zasilania (układ oddechowy, układ sercowo-naczyniowy i układ pokarmowy). Układ ten pobiera pokarm i tlen ze środowiska, przetwarza je i rozprowadza jako substancje energetyczne w całym organizmie. Układ sterowania uczestniczy w przekazywaniu informacji od i do układu zasilania i układu ruchu. Określenie celu działania, pamięć, emocje itp. są także funkcjami układu sterowania.

Model relacji między zewnętrznymi czynnikami oddziaływania, procesami struktur wewnętrznych, czyli układów ruchu, sterowania i zasilania, oraz skutkami takiego oddziaływania (model interakcji – MI) przedstawiono w artykule Roman-Liu [10]. W uproszczeniu według tego modelu wewnętrzna struktura pracownika w określonym punkcie czasu charakteryzowana jest pojemnością. Na tę pojem-

ność mają wpływ kolejne dawki oddziaływania jednostkowego, sumowanego w obrębie jednostki czasu, np. godziny, ale także zmiany roboczej, miesiąca, roku itd. Oddziaływanie i pojemność determinują odpowiedź struktur wewnętrznych. Reagując przez cały czas na oddziaływanie, organizm pracownika może się dostosowywać, zwiększając lub zmniejszając swoją pojemność. Zatem pojemność, rozumiana jako stan struktur ciała w danym momencie czasu, określa możliwości psychofizyczne pracownika do opierania się destabilizacji wynikającej z oddziaływania zewnętrznych czynników obciążenia. Oddziaływanie jednostkowe bądź powtarzane, składające się na obciążenie pracę, zaburza ten stan.

Oddziaływanie (obciążenie zewnętrzne)

Metody stosowane do oceny obciążenia zewnętrznego

Oddziaływanie, czyli obciążenie zewnętrzne, może się odnosić do jednej czynności pracy, jednej operacji, zestawu operacji czy całego dnia pracy. Obciążenie wynikające z wykonywania pojedynczej czynności, czyli oddziaływanie jednostkowe, wynika z łącznego oddziaływania danej pozycji ciała i siły. Stąd też jest charakteryzowane zmiennymi odnoszącymi się do pozycji ciała i wywieranej siły. W przypadku gdy określane jest oddziaływanie operacji lub całego dnia pracy, trzeba uwzględnić rytm pracy i czas trwania poszczególnych czynności. Do wyrażenia oddziaływania w sposób ilościowy stosuje się wiele różnych metod. Metody te zawierają w sobie trzy podstawowe moduły: dane wejściowe, procedurę oceny oraz wskaźniki obciążenia (rys. 1). W przypadku metod oceny ryzyka występują dodatkowo kryteria, które umożliwiają zakwalifikowanie obciążenia – na podstawie wartości wskaźnika obciążenia – do określonego poziomu ryzyka.

Tabela 1. Sposób definiowania pozycji ciała w różnych metodach oceny obciążenia zewnętrznego – ekspozycji (źródło własne)
 Table 1. Method of defining body position in various methods that assess external load – exposure (own source)

Metoda	Sposób definiowania pozycji ciała
SHIFTRISK	Wartości kątów w stawach kończyn górnych i dolnych, pleców i szyi
RULA, REBA	Kody przypisane zakresom kątów w stawach oraz określane jakościowo
OWAS	Kody przypisane jakościowemu opisowi położenia członów ciała
OCRA	Współczynniki zależne od jednego z dwóch zakresów kątów w stawach oraz czasu utrzymywania pozycji
NIOSH	Współczynniki o wartościach zależnych od wymiarów stanowiska pracy

Wśród najczęściej stosowanych metod oceny obciążenia zewnętrznego można wymienić: OWAS [11-13], RULA [14] i REBA [15, 16], a także NIOSH [17] i OCRA [18, 19]. Metoda taka jak SHIFTRISK [20], która została zaimplementowana jako program komputerowy, również należy do grupy metod umożliwiających stosunkowo prostą ocenę obciążenia mięśniowo-szkieletowego na podstawie zmiennych opisujących czynniki biomechaniczne. Wszystkie wymienione metody służą zarówno ocenie obciążenia, jak i ryzyka rozwoju MSDs, lecz różnią się między sobą sposobem definiowania zmiennych wejściowych i procedurą oceny oraz zakresem zastosowania. Metody RULA i REBA są przeznaczone do oceny obciążenia jednostkowego dla pozycji ciała wybranych spośród występujących podczas pracy, przy uwzględnieniu charakteru pracy. Metoda OCRA jest odpowiednia do oceny obciążenia kończyn górnych w kontekście wykonywania pracy powtarzalnej o zdefiniowanym cyklu pracy. Metoda NIOSH znajduje zastosowanie w ocenie obciążenia kręgosłupa podczas ręcznego transportu ładunków, również w przypadku wykonywania szeregu takich samych czynności. Metoda SHIFTRISK umożliwia zaś ocenę oddziaływania jednostkowego, wynikającego z pojedynczej czynności pracy, jak również ocenę obciążenia i ryzyka powiązane z wykonywaniem wszystkich czynności podczas dnia pracy – zarówno czynności takich samych (praca powtarzalna), jak i zróżnicowanych.

Ze względu na to, że dane wejściowe mają kluczowe znaczenie dla całej oceny, istotna jest zarówno liczba oraz sposób definiowania tych danych, jak i sposób ich pozyskiwania. W przedstawionych metodach dane wejściowe, czyli zmienne charakteryzujące czynniki biomechaniczne, odnoszą się do konkretnych wartości lub zakresów wartości. W zaprezentowanej analizie omówiono różnice i podobieństwa poszczególnych metod oraz dotyczące zmiennych wejściowych determinujących oddziaływanie jednostkowe, czyli odnoszących się do pozycji ciała i wywieranych sił podczas pojedynczej czynności pracy.

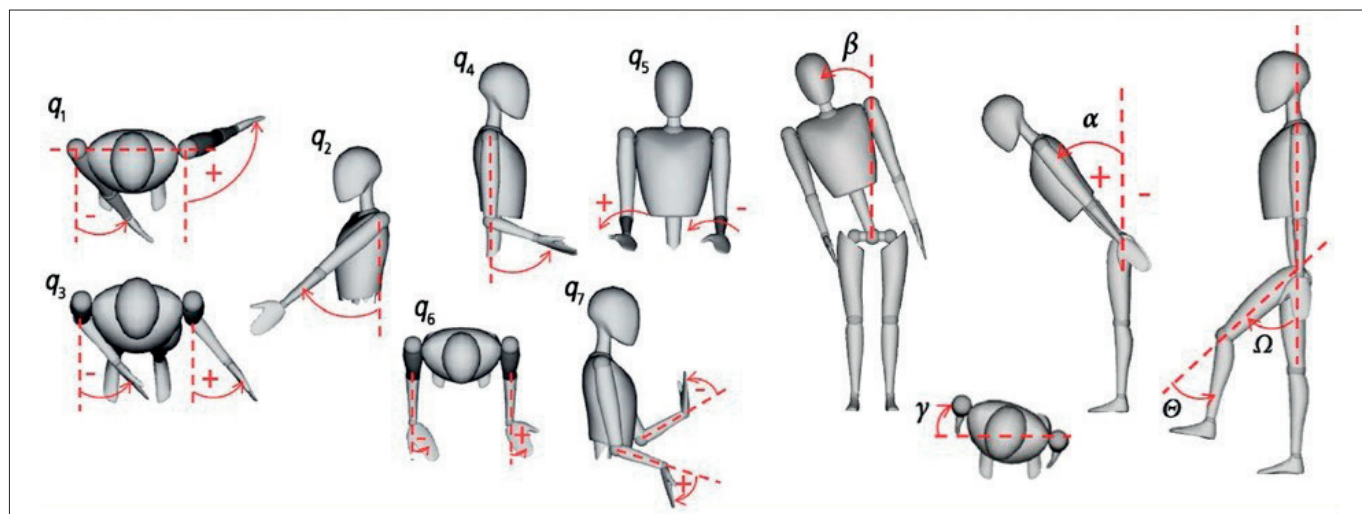
Zmienne wejściowe definiujące pozycję ciała w wybranych metodach oceny obciążenia

Zasadniczo pozycja ciała jest definiowana wielkościami kątów między członami ciała (kątów w stawach). Jednakże są metody, w których wartość kąta zastępowana jest odniesieniem do zakresu wartości (tab. 1), przy czym w niektórych przypadkach występuje odniesienie tylko do jednego z dwóch zakresów, co pozwala na przyjęcie, że zmienna ma charakter jakościowy. Zakresy wartości transponowane są na wartości odpowiednich kodów, które następnie służą jako dane do oceny przeprowadzanej zgodnie z procedurą właściwą dla danej metody. W jednej metodzie pozycja ciała uwzględniająca zakres czasowy jej występowania podczas pracy wyrażana jest

wartością współczynnika pozycji ciała, a w innej metodzie współczynnik pozycji ciała jest definiowany na podstawie wymiarów stanowiska pracy.

Zmienne ilościowe odpowiadające wielkościom kątów w stawach zazwyczaj odnoszą się do uproszczonego modelu ludzkiego ciała, odwzorowującego położenie kończyn górnych, pleców, głowy i kończyn dolnych. Położenie w jednym stawie może być definiowane wartościami trzech lub dwóch kątów albo jednego kąta w zależności od stawu i przyjętego modelu. Największą liczbą zmiennych definiujących położenie ciała (24 kąty) występuje w metodzie SHIFTRISK (rys. 2). W modelu tym przyjęto, że położenie kończyny górnej opisywane jest wielkościami siedmiu kątów ($q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7$) odnoszących się do odwodzenia/przywodzenia ramienia (q_1), zginania/prostowania ramienia (q_2), obrotu ramienia (q_3), zgięcia w łokciu (q_4), pronacji/supinacji (q_5), odwodzenia/przywodzenia nadgarstka (q_6) oraz zginania/prostowania nadgarstka (q_7) [20]. Pozycję kręgosłupa określa kąt położenia głowy (szyi) oraz kąt położenia kręgosłupa w części lędźwiowej (pleców). W przypadku części lędźwiowej pleców istotne jest położenie pleców z uwzględnieniem wielkości kątów: pochylenia (α), zginania bocznego (β) i skrętu (γ). Położenie szyi jest opisywane przez kąt pochylenia (r), kąt zginania bocznego (φ) i kąt skrętu (χ) szyi. W opisie położenia kończyn dolnych uwzględniono kąt w stawie biodrowym (Ω) i kąt w stawie kolanowym (θ).

W metodach RULA [14] i REBA [15] dane wejściowe (kody) określa się w odniesieniu do zakresu kąta w stawie. W przypadku kończyny górnej danymi wejściowymi są: kod ramienia (Ca), kod przedramienia (Cf), kod ręki (Cw) i kod skrętu przedramienia (Cr) (zob. tabelę). Stosując oznaczenia przyjęte w metodzie SHIFTRISK, kody odpowiadające zakresom wartości odnoszą się odpowiednio do kątów: q_2 w stawie ramiennym, q_4 w stawie łokciowym i q_7 w stawie nadgarstkowym. Wartość Ca zwiększana jest o 1, jeżeli występuje podniesienie stawu ramiennego lub odwodzenie ramienia (q_1). Natomiast jeśli ramię



Rys. 2. Kąty definiujące, w sposób uproszczony, położenie pleców, kończyn górnych i kończyn dolnych, stanowiące dane wejściowe w metodzie SHIFTRISK (źródło własne)
 Fig. 2. Angles defining, in a simplified way, the position of the back, upper limbs and lower limbs, constituting input data in the SHIFTRISK method (own source)

Tabela 2. Wartość kodów położenia kończyny górnej, pleców i szyi w zależności od zakresu kąta w metodach RULA i REBA

Table 2. The value of the codes for the position of the upper limb, back and neck depending on the angle range in the RULA and REBA methods

Ramie		Przedramię		Ręka			Plecy		Szyja		
q_2 [°]	Ca	q_4 [°]	Cf	q_7 [°]	Cw		α [°]	Cb	τ [°]	Cn	
					RULA	REBA				RULA	REBA
< -20	2	0-60	2	0	1	1	0	1	0-20	1	1
-20-20	1	60-100	1	0-15	2		0-20	2	10-20	2	2
20-45	2	> 100	2	> 15	3	2	20-60	3	> 20	3	
45-90	3			-15-0	2	1	> 60	4	< 0	4	2
> 90	4			< -15	3	2	> 90	4			

jest podparte, to wartość kodu jest zmniejszana o 1. W przypadku Cf , jeżeli występuje odwodzenie przedramienia lub przedramię przecina oś ciała (q_3), kod zwiększany jest o 1, ale tylko w metodzie RULA. Wartość Cw jest zwiększana o 1, jeśli występuje odwodzenie w nadgarstku (q_6). W przypadku gdy występuje pronacja lub supinacja przedramienia (q_5), kod Cf wynosi 1, jeśli kąt jest poniżej zakresu ruchu, lub przyjmuje wartość 2, gdy kąt jest powyżej połowy zakresu ruchu.

Podobne podejście zostało przyjęte w celu zdefiniowania położenia głowy (szyi), tułowia (pleców) oraz nóg. Położenie pleców i szyi definiowane jest kątem zginania, odpowiednio α i τ . W przypadku kodu pleców (Cb) w metodach RULA i REBA uwzględniono takie same zakresy wartości kątów definiujących położenie pleców, dla których nadawane są takie same wartości kodów. Pewne różnice między metodami RULA i REBA występują w przypadku pochylenia głowy, a dotyczą przyjętych zakresów wielkości kąta i odpowiadających im kodów położenia. Kod Cb zwiększany jest o 1, jeżeli występuje zginanie boczne lub obrót pleców (kąty β i γ). Podobnie jeżeli występuje zginanie boczne lub obrót szyi (ϕ i χ), wtedy kod Cn zwiększany jest o 1. W przypadku kodu nóg (Cf) w obydwu metodach nadawany jest kod 1, gdy podczas wykonywania ocenianej czynności pracy występuje stanie na dwóch nogach, siedzenie lub chodzenie. Kod Cf wynosi 2, jeżeli ciężar ciała jest rozłożony nierównomiernie lub występuje stanie na jednej nodze. Dodatkowo w metodzie REBA kod zwiększany jest o 1, jeżeli kąt w stawie kolanowym (θ) mieści się w zakresie 30-60°. Natomiast jeżeli kąt ten przekracza 60°, kod jest zwiększany o 2.

W metodzie OWAS [11-13] pozycja ciała definiowana jest w sposób jakościowy wartościami trzech kodów, które odnoszą się do położenia pleców, ramion oraz nóg. Wartość kodu określana jest w zależności od tego, czy występuje odchylenie od naturalnej pozycji ciała. Kod położenia pleców może przybierać wartości od 1 do 4, gdy plecy są odpowiednio: wyprostowane, zgięte do przodu, skrzyżowane lub zgięte i skrzyżowane. Położeniu ramion odpowiadają kody od 1 do 3 w zależności od tego, czy: obydwa łokcie są poniżej stawu ramiennego, jeden łokieć jest powyżej oraz obydwa łokcie są powyżej stawu ramiennego. Kody położenia kończyn dolnych mają wartości od 1 do 7. Uwzględniane są następujące pozycje: siedząca, stojąca z nogami wyprostowanymi,

stojąca z jedną nogą wyprostowaną, stojąca z nogami zgiętymi, stojąca z jedną nogą zgiętą, klęk na jednym lub obu kolanach oraz chodzenie.

Inne podejście zastosowano w metodzie OCRA [18, 19], która służy do oceny obciążenia tyłko kończyny górnej zaangażowanej w wykonywanie czynności powtarzalnych. Położenie kończyny jest definiowane kątami: zginania/prostowania łokcia (q_4), pronacji i supinacji przedramienia (q_5), zginania/prostowania (q_7) oraz przywodzenia/odwodzenia nadgarstka (q_6). Dla każdego z tych kątów określono wartości graniczne dzielące położenie na dwa obszary – strefę wygody i strefę zagrożenia. Na podstawie określonego procentowo czasu, w trakcie którego położenie znajduje się w strefie zagrożenia, wyznaczana jest zmienna definiująca pozycję ciała w postaci tzw. współczynnika pozycji ciała, który jest uwzględniany w procedurze oceny metodą OCRA.

W metodzie NIOSH [17] pozycja ciała jest definiowana czterema parametrami opisującymi położenie podnoszonego ładunku. Do tych parametrów należą: początkowa wysokość podnoszonego ładunku, określana jako odległość środka ciężkości podnoszonego przedmiotu (punktów środkowych dłoni) od podłoża; położenie poziome, definiowane jako pozioma odległość między punktami środkowymi dłoni a punktem środkowym między kostkami stóp; przemieszczenie przedmiotu w pionie, będące wartością bezwzględną różnicy między położeniami pionowymi na początku i na końcu podnoszenia; kąt asymetrii będący kątem skrętu pleców.

Sposób definiowania wywieranej siły

Siła wywierana podczas pracy jest uwarunkowana rodzajem wykonywanej pracy i opisywana typem aktywności siłowej. Wywierana siła może być np. siłą związaną z podnoszeniem dużych ładunków lub ścisaniem przedmiotu w rękę. Określony typ siły może wymagać aktywowania mięśni całego ciała lub tylko mięśni kończyny górnej bądź kończyny dolnej. W odniesieniu do pracy mięśni siła zewnętrzna może być wyrażana jako wartość bezwzględna, np. w niutonach lub kilogramach siły. Często możliwości siłowe są wyrażane jako moment siły, w niutonometrach.

Metody różnią się ze względu na sposób definiowania siły wywieranej podczas kolejnych czynności pracy. Zasadniczo siła powinna być definiowana przez jej wartość i typ, przy czym wartość siły może być podawana jako nominalna lub jako

względna. Siła względna jest uzyskiwana jako stosunek siły wywieranej podczas danej czynności pracy do wartości siły maksymalnej, uzyskanej dla takiego samego położenia zaangażowanych członów ciała i takiego samego typu siły. Ten sposób definiowania siły przyjęto w metodzie SHIFTRISK, w której uwzględniono typowe aktywności siłowe, najczęściej wykonywane podczas czynności pracy [20]. Wśród aktywności siłowych kończyny górnej wyróżniono wykonywanie czynności manipulacyjnych, takich jak ścisk ręki lub chwyt palcami. Innymi często występującymi na stanowisku pracy typami aktywności siłowej są siła pchania, czyli siła związana z koniecznością przemieszczenia przedmiotu, działająca od siebie wzdłuż osi nadgarstka (konieczność wywierania siły np. podczas pracy wiertarką), oraz siła (moment siły) odwracania i nawracania (wkręcanie i odkręcanie).

W większości omawianych metod wywierana siła uwzględniana jest w sposób uproszczony. W metodach RULA, REBA i OWAS zakresem wartości siły przyporządkowane są wartości kodów. W metodzie RULA oprócz wartości wywieranej siły uwzględniany jest jej charakter. Kod wynoszący 0 nadawany jest wtedy, gdy siła jest mniejsza niż 2 kg i ma zmienny charakter. Jeżeli siła o zmiennym charakterze jest między 2 a 10 kg, wówczas kod wynosi 1, a gdy dla tego samego przedmiotu siła jest przyjęta jako siła o charakterze statycznym lub powtarzalnym – kod wynosi 2. Kod wynosi 3, gdy wywierana taka siła jest powyżej 10 kg. W metodzie REBA siła poniżej 5 kg odpowiada kod 0, siła przedmiotu między 5 a 10 kg – kod 1, a siła powyżej 10 kg – kod 2. Dodatkowo jeżeli występuje gwałtowne wywieranie siły, wcześniej przyjęty kod jest zwiększany o 1.

W metodzie OWAS kod siły w zależności od zakresu jej wartości jest klasyfikowany jako 1, 2 lub 3. Na potrzeby oceny ryzyka w Polsce zróznicowano wartości siły zewnętrznej stosownie do podziału na grupy mężczyzn, kobiet i młodocianych, zgodnie z obowiązującymi w kraju aktami prawnymi [13].

W metodzie OCRA zastosowano podejście oparte na subiektywnej ocenie odczuwania uciążliwości wywierania siły. Uciążliwość określa się z wykorzystaniem skali Borga [21], jeśli ocenie podlegają stanowisko i pracownik, który może subiektywnie ocenić uciążliwość pracy. Istnieje także możliwość przypisania wartości współczynnika siły w zależności od jej wartości względnej, wyrażanej jako % MVC.

Wartość względną dla każdej czynności pracy uzyskuje się np. w wyniku pomiarów wartości siły wywieranej podczas czynności pracy i siły określającej maksymalne możliwości pracownika. Bardzo często wartością siły wywieranej podczas danej czynności jest parametrem związanym ze stanowiskiem lub z procesem pracy, co oznacza, że wartości bezwzględne wywieranych sił są dostępne w dokumentacji stanowiska lub procesu pracy. Wartości siły maksymalnej danego typu można uzyskać w wyniku obliczeń z zastosowaniem zależności matematycznych wyrażających wartość siły jako funkcję kątów definiujących położenie określonych członów ciała [20]. Różne typy siły charakteryzują się różnymi wartościami siły lub momentu siły maksymalnej. Wartość wywieranej siły charakteryzującej możliwości siłowe zależy od typu siły, obszaru ciała zaangażowanego w jej wywieranie oraz od pozycji ciała przyjmowanej podczas wywierania siły.

Metody oceny reakcji organizmu na oddziaływanie (obciążenie wewnętrzne)

W każdym momencie, bez względu na poziom i rodzaj wysiłku fizycznego, stan organizmu może być opisany z zastosowaniem miar fizjologicznych wskazujących na reakcję organizmu na zadawane obciążenie zewnętrzne (oddziaływanie). Na podstawie wysiłku rejestrowanego za pomocą miar fizjologicznych można ocenić obciążenie wewnętrzne. Zgodnie z modelem Kędziora i Wita [9] w aktywności fizycznej uczestniczą układ zasilania i układ ruchu. Tak więc pojemność (wydolność) i odpowiedź (wysiłek) mogą być pośrednio ocenione przez miary układu mięśniowego, układu krążenia i układu oddychania.

Zarówno stałe utrzymywanie pozycji ciała, jak i ruch są możliwe dzięki skurczom mięśni zachodzącym w wyniku pobudzenia jednostek motorycznych. Poziom napięcia mięśniowego podczas skurczu, czyli wysiłek mięśni, jest

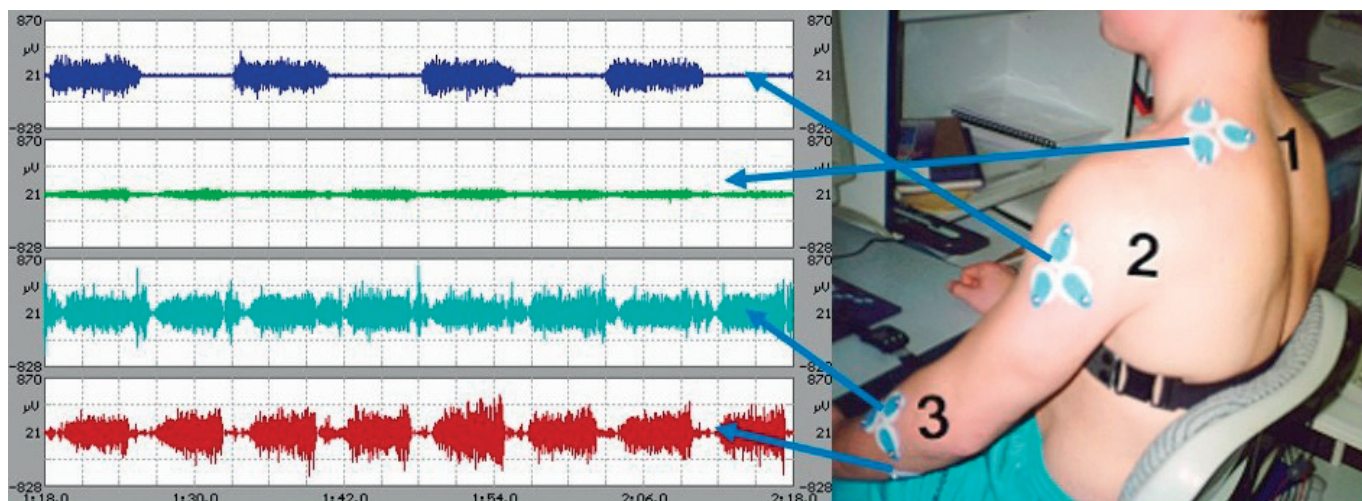
oceniany z zastosowaniem elektromiografii (EMG). W biomechanice pracy pomiary służące ocenie zaangażowania mięśni w wywieranie siły przeprowadzane są z zastosowaniem elektrod powierzchniowych naklejanych nad badanym mięśniem. Zarejestrowany i nieprzetworzony sygnał EMG zawiera w sobie tylko informację jakościową, umożliwiającą określenie, czy mięsień jest aktywny i czy generuje siłę oraz w jakich odcinkach czasu pracuje z większą lub mniejszą siłą. Na rys. 3 przedstawiono miejsca naklejenia elektrod nad mięśniami kończyny górnej oraz odpowiadający tym mięśniom zapis sygnału EMG uzyskany podczas ścisku ręki.

W celu uzyskania informacji powiązanych z sygnałem EMG w sposób ilościowy stosowane są matematyczne procedury obliczeniowe różnych parametrów definiowanych w dziedzinie czasu lub częstotliwości. Analiza sygnału w dziedzinie czasu jest przeprowadzana na podstawie przebiegu nieprzetworzonego sygnału EMG lub po wstępnej obróbce [22]. Najczęściej stosowanymi parametrami do wyrażenia siły mięśni są następujące zmienne: zintegrowana amplituda sygnału (*IEMG*), amplituda średnia (*ARV*) oraz wartość średnia kwadratowa (*RMS*).

Ze względu na czynniki, które wpływają na charakterystykę sygnału EMG, nie jest wskazane porównywanie między badanymi osobami czy badanymi mięśniami wartości bezwzględnej amplitudy. Stosowanie bezwzględnej wartości amplitudy sygnału EMG jest uzasadnione tylko wtedy, gdy celem badania jest śledzenie zmian w czasie podczas ciągłego pomiaru, czyli bez zmiany umiejscowienia elektrod. Gdy porównuje się wyniki pomiarów wykonanych dla odmiennych mięśni, różnych osób albo w badaniach prowadzonych po ponownym naklejeniu elektrod, wymagana jest normalizacja, czyli przeskalowanie sygnału w stosunku do znanej i powtarzalnej wartości. Po przeprowadzeniu normalizacji amplituda sygnału EMG jest wyrażana jako wartość względna w sposób wspólny dla wszystkich

sytuacji pomiarowych, badanych osób i mięśni. Wartości znormalizowane sygnału EMG uzyskuje się przez odniesienie wartości zmierzonej do wartości referencyjnej, przy czym wartością referencyjną uzyskuje się z tych samych mięśni, przy tej samej konfiguracji elektrod. Przyjęty test uzyskania maksymalnych możliwości danego mięśnia powinien uwzględniać taki typ wywieranej siły zewnętrznej oraz takie położenie członów ciała, przy których występuje maksymalna aktywacja mięśnia.

Energia wykorzystywana przez organizm do skurczu mięśni i poprzez to do wykonywania różnych czynności jest uzyskiwana w wyniku utleniania składników odżywczych, takich jak węglowodany, tłuszcze i białka. W reakcjach utleniania jest zużywany tlen i wydzielany dwutlenek węgla w ilościach proporcjonalnych do wydatkowanej energii. Ilość tlenu dostarczanego z krwią do komórek mięśniowych zależy przede wszystkim od częstości skurczów serca i objętości tlenu pobieranego podczas oddychania (V_{O_2}), czyli miar charakteryzujących działanie układu oddechowego i sercowo-naczyniowego. Objętość pobieranego tlenu jest miarą względną, co oznacza, że nie można ocenić, jak duży jest wysiłek fizyczny dla danej osoby. Określony wysiłek fizyczny może być wysiłkiem ciężkim dla osoby o małej wydolności lub wysiłkiem lekkim – dla osoby o wydolności dużej. Dlatego w ocenie intensywności wysiłku lepiej od miar bezwzględnych sprawdzają się miary względne. Obciążenie względne jest wyrażane proporcją między pobieraniem tlenu podczas wykonywania danych czynności, wyrażanym objętością pobieranego tlenu (V_{O_2}), a maksymalnym pobieraniem tlenu przez organizm ($V_{O_{2max}}$), określającym największą ilość tlenu, jaką organizm jest w stanie pobrać w ciągu jednej minuty podczas maksymalnego wysiłku. W trakcie wysiłku o bardzo dużej intensywności pobieranie tlenu osiąga maksimum i nie rośnie przy dalszym wzroście mocy wysiłku. Obciążenie względne jest wyrażane jako $\% V_{O_{2max}}$.



Rys. 3. Elektrody umieszczone nad mięśniami kończyny górnej i odpowiadający tym mięśniom zapis sygnału EMG uzyskany podczas wywierania siły typu ścisk ręki (źródło własne)
 Fig. 3. Electrodes placed over the muscles of the upper limb and the EMG signal corresponding to these muscles obtained when exerting a handgrip force (own source)

Podsumowanie

W artykule nakreślono zależności między obciążeniem wynikającym z wykonywanych czynności pracy a reakcją struktur wewnętrznych ciała pracownika na to obciążenie. Zaprezentowano metody oceny oddziaływania oraz reakcji na to oddziaływanie. Metody oceny obciążenia zewnętrznego przedstawiają ocenę obciążenia nieuwzględniającą cech indywidualnych pracownika (zakładają np., że każdy z pracowników przyjmuje taką samą pozycję ciała). Natomiast metody oceny obciążenia wewnętrznego, czyli reakcji organizmu na obciążenie, uwzględniają możliwości psychofizyczne pracownika i w związku z tym przedstawiają ocenę dla tego konkretnego pracownika.

Podczas szacowania wartości względnej siły należy pamiętać, że położenie ciała wpływa nie tylko na obciążenie w stawach pod wpływem wywieranej siły, lecz także na możliwości siłowych. Dlatego pomiary maksymalnych możliwości siłowych powinny być dokonywane w odniesieniu do takiego samego położenia ciała i typu siły wywieranej podczas czynności pracy. Możliwe jest także odniesienie wywieranej siły do możliwości siłowych obliczonych na podstawie opracowanych zależności matematycznych, gdzie siła maksymalna określonego typu jest wyrażona jako funkcja kątów położenia [23].

Obciążenie o określonych dawkach, powtarzane przed długi czas, może prowadzić do zmian w zakresie możliwości psychofizycznych pracownika, powodując rozwój dolegliwości. Jednakże wysiłek fizyczny podczas programów treningowych z dużym obciążeniem może mieć także korzystne skutki dla organizmu [24, 25]. Zatem obciążenie fizyczne wywołane przez czynniki biomechaniczne związane z pozycją ciała i wywieranymi siłami może spowodować nie tylko utratę zdrowia, lecz również poprawę jego stanu.

Wiele publikacji wskazuje na bezpośredni związek między rodzajem wykonywanej pracy a WMSDs [26, 27]. Jednak wykazanie tego związku w sposób ilościowy jest dużym wyzwaniem m.in. ze względu na zróżnicowanie czynności wykonywanych podczas pracy i oddziaływania. Poziom oddziaływanie w danej jednostce czasu może być określony ilościowo jako funkcja parametrów odnoszących się do pozycji ciała oraz wywieranej siły. Znacznie trudniejsze do wyrażenia ilościowego są zależności wewnętrzne, na które wpływ mają także parametry opisujące cechy indywidualne. Zależy zatem potrzeba wykonania dużej liczby badań oraz opracowania procedur, które umożliwią ilościową i wiarygodną ocenę oddziaływania z uwzględnieniem czynnika czasu, a także badań pozwalających na ilościowe wyrażenie odpowiedzi przy uwzględnieniu czynników indywidualnych. W tym kontekście znaczenie ma również dokładność pomiaru danych opisujących pozycję ciała i wywierane siły.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FERGUSON S.A. i in. Biomechanical, psychosocial and individual risk factors predicting low back functional impairment among furniture distribution employees. *Clinical Biomechanics*. 2012, 27(2): 117-123; doi: j.clinbiomech.2011.09.002.
- [2] HARRIS-ADAMSON C. i in. Occupational risk factors for work disability following carpal tunnel syndrome: a pooled prospective study. *Occupational Environmental Medicine*. 2022, 79: 442-451; doi: 10.1136/oemed-2021-107771.
- [3] LEITE W.K.D.S. i in. Risk factors for work-related musculoskeletal disorders among workers in the footwear industry: a cross-sectional study. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*. 2021, 27(2): 393-409.
- [4] PRALL J., ROSS M. The management of work-related musculoskeletal injuries in an occupational health setting: the role of the physical therapist. *Journal of Exercise Rehabilitation*. 2019, 15(2): 193.
- [5] BONFIGLIOLI R., CARABALLO-ARIAS Y., SALMEN-NAVARRO A. Epidemiology of work-related musculoskeletal disorders. *Current Opinion in Epidemiology and Public Health*. 2022, 1(1): 18-24.
- [6] PUNNETT L. i in. Estimating the global burden of low back pain attributable to combined occupational exposures. *American Journal of Industrial Medicine*. 2005, 48: 459-469.
- [7] SMITH D.R. i in. A detailed analysis of musculoskeletal disorder risk factors among Japanese nurses. *Journal of Safety Research*. 2006, 37(2): 195-200.
- [8] EATOUGH E.M., WAYA J.D., CHANG CH.H. Understanding the link between psychosocial work stressors and work-related musculoskeletal complaints. *Applied Ergonomics*. 2012, 43: 554-563.
- [9] KĘDZIOR K., WIT A. *Biomechanika*. Warszawa: Politechnika Warszawska, Akademia Wychowania Fizycznego, 2002. [rękopis na prawach maszynopisu].
- [10] ROMAN-LIU D. External load and the reaction of the musculoskeletal system – A conceptual model of the interaction. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2013, 43(4): 356-362.
- [11] KARHU U., KANSI P., KUORINKA I. Correcting working postures in industry. A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*. 1977, 8(4): 199-201.
- [12] KARHU O. i in. Observing working postures in industry: examples of OWAS application. *Applied Ergonomics*. 1981, 12(1): 13-17.
- [13] ROMAN-LIU D., TOKARSKI T. Ocena obciążenia statycznego z zastosowaniem metody OWAS. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*. 2010, 7-8: 28-31.
- [14] McATAMNEY L., CORLETT E.N. RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*. 1993, 24(2): 91-99.
- [15] HIGNETT S., McATAMNEY L. Rapid Entire Body Assessment (REBA). *Applied Ergonomics*. 2000, 31(2): 201-205.
- [16] ROMAN-LIU D. Ocena ryzyka rozwoju dolegliwości mięśniowo-szkieletowych z zastosowaniem metody REBA. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*. 2009, 11: 12-15.
- [17] WATERS T.R. i in. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks. *Ergonomics*. 1993, 36(7): 749-776.
- [18] OCCHIPINTI E. OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. *Ergonomics*. 1998, 41(9): 1290-1311.
- [19] ŁACH P., ROMAN-LIU D. Ocena ryzyka na stanowisku pracy powtarzalnej z zastosowaniem metody OCRA. *Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka*. 2017, 7: 16-20.
- [20] ROMAN-LIU D. *Wybrane zagadnienia biomechaniki pracy*. Warszawa: CIOP-PIB, 2015.
- [21] BORG G. Borg's perceived exertion and pain scales. *Human Kinetics*, 1998.
- [22] MAZURKIEWICZ P. Zastosowanie wielorozdzielczej analizy sygnału do opisu aktywności mięśnia podczas chodu. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2005, 1(1-2): 171-174.
- [23] ROMAN-LIU D. *Analiza biomechaniczna pracy powtarzalnej*. Warszawa: CIOP-PIB, 2003.
- [24] ROOKS D.S., SILVERMAN C.B., KANTROWITZ F.G. The Effects of Progressive Strength Training and Aerobic Exercise on Muscle Strength and Cardiovascular Fitness in Women With Fibromyalgia: A Pilot Study. *Arthritis & Rheumatology*. 2002, 47: 22-28.
- [25] YLINEN J. i in. Active neck muscle training in the treatment of chronic neck pain in women. A randomized controlled trial. *Journal of the American Medical Association*. 2003, 289(19): 2509-2516.
- [26] ASGHARI E. i in. Musculoskeletal pain in operating room nurses: Associations with quality of work life, working posture, socio-demographic and job characteristics. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 2019, 72: 330-337; doi: 10.1016/j.ergon.2019.06.009.
- [27] BAZAZAN A. i in. Association of musculoskeletal disorders and workload with work schedule and job satisfaction among emergency nurses. *International Emergency Nursing*. 2019, 44: 8-13; doi: 10.1016/j.ienj.2019.02.004.

Opracowano i wydano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy” (zadanie nr 3.ZS.11 pt. „Określenie składowych obciążenia biomechanicznego i psychicznego jako komponentów ryzyka rozwoju dolegliwości mięśniowo-szkieletowych”), finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej (do 12 grudnia 2023 r. – pn. Ministerstwo Rodziny i Polityki Społecznej). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.