

CENA obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego pracą fizyczną z wykorzystaniem programu komputerowego **LIMB**

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

Program LIMB składa się z dwóch części opisanych jako *Ręczny transport ładunków* i *Praca kończyn górnych*. Część *Ręczny transport ładunków* umożliwia policzenie dopuszczalnej siły dla czynności, w których zaangażowane jest całe ciało, jak: podnoszenie, ciągnięcie i pchanie w zależności od wartości parametrów opisujących warunki pracy. Część *Praca kończyn górnych* dotyczy takich czynności, w których zaangażowane są głównie kończyny górne. Część ta składa się z dwóch modułów *Siła maksymalna* oraz *Praca powtarzalna*. Moduł *Siła maksymalna* umożliwia wyznaczenie wartości maksymalnej siły podstawowych typów aktywności siłowej kończyny górnej (pchanie, podnoszenie, nawracanie, odwracanie, ścisk ręki, chwyt palcowy, chwyt boczny, chwyt szczypcowy) dla dowolnego położenia kończyny górnej, opisywanego za pomocą siedmiu kątów. Moduł *Praca powtarzalna* dostarcza wartości wskaźników obciążenia kończyny górnej (wskaźnik obciążenia cyklu oraz wskaźnik obciążenia pracą powtarzalną) wynikającego z wykonywania pracy opisanej wartościami określonych parametrów (długość fazy, liczba typów sił składających się na fazę, wartość względna lub bezwzględna każdego z typów sił).

Assessment of musculoskeletal load resulting from physical work with the application of the LIMB computer program

The LIMB program consists of two parts: Manual Load Handling and Upper Limb Work. Manual Load Handling makes it possible to calculate the acceptable force for activities that involve the entire body – such as lifting, pulling and pushing – depending on the parameters of working conditions.

The Upper Limb Work part refers to tasks in which mostly the upper limbs are involved. This part consists of the Maximum Force module for eight types of upper limb activities (pushing, lifting, pronation, supination, handgrip, palmar pinch, lateral pinch, tip pinch) and the Repetitive Work module. Repetitive Work provides upper limb load indicators (integrated cycle load and repetitive task factor) that result from performing work described with specified parameter values.

Wstęp

Ryzyko powstawania schorzeń układu mięśniowo-szkieletowego jest ściśle związane z czynnikami biomechanicznymi środowiska pracy, takimi jak pozycja ciała podczas pracy, wywierana siła i czas utrzymywania pozycji ciała i/lub wywieranej siły. Zmniejszenie ryzyka jest możliwe przez właściwy dobór wartości parametrów wpływających na obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego, czyli parametrów opisujących wspomniane czynniki. Badania doświadczalne dostarczają danych odnoszących się do obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego w zależności od typu czynności pracy. Jest stosunkowo dużo danych dotyczących czynności wykonywanych z wykorzystaniem dużych grup mięśniowych w pozycji stojącej i związanych z wywieraniem stosunkowo dużych sił zewnętrznych jak np. podnoszenie, przenoszenie oraz ciągnięcie i pchanie dużych i ciężkich przedmiotów. Jednakże

na stanowiskach pracy, obok wspomnianych czynności bardzo często występują prace, w wykonywanie których są zaangażowane tylko kończyny górne, przy statycznym obciążeniu kończyn dolnych i kręgosłupa. Czynności pracy, podczas których występuje głównie aktywność ruchowa kończyn górnych, a w szczególności czynności określane mianem „praca powtarzalna”, stanowią duże zagrożenie chorobami i dolegliwościami układu mięśniowo-szkieletowego.

W wyniku badań doświadczalnych i teoretycznych opracowano zależność matematyczną wyrażającą wartość masy granicznej, dopuszczalnej do podnoszenia w zależności od pozycji ciała podczas podnoszenia oraz częstości powtórzeń [1, 2]. Opublikowano także wyniki badań dotyczących sił pchania, ciągnięcia i podnoszenia, z uwzględnieniem wysokości umieszczenia uchwytu oraz płci i wymiarów antropometrycznych pracownika [3].

Brak jest natomiast stosownych danych i metod, które umożliwiłyby ocenę obciążenia podczas prac powtarzalnych wykonywanych przez kończyny górne, przy statycznym obciążeniu pleców i kończyn dolnych. Brak ten skłonił do zebrania wyników wcześniejszych badań własnych oraz zaczerpniętych z literatury wyników badań innych badaczy i na ich podstawie opracowania algorytmu oceny obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego kończyny górnej na stanowiskach pracy powtarzalnej. Wykorzystano równania matematyczne opisujące zależności dopuszczalnej siły od pozostałych parametrów opisujących pozycję ciała i częstości powtórzeń. Model ten umożliwia wyznaczenie – w formie parametrów – obciążenia kończyny górnej w zależności od parametrów opisujących wykonywaną pracę, przy uwzględnieniu wszystkich czynników odgrywających rolę w obciążeniu tej kończyny [4].

Algorytmy wyznaczania dopuszczalnej siły w odniesieniu do podstawowych typów aktywności siłowej kończyny górnej oraz oceny obciążenia tej kończyny z wykorzystaniem modelu pracy powtarzalnej zostały zaimplementowane do programu komputerowego LIMB. W programie tym zawarto także procedury umożliwiające obliczenie dopuszczalnej siły maksymalnej podczas czynności podnoszenia, ciągnięcia i pchania. Oznacza to, że program zawiera moduł oceny obciążenia pracą przy wykonywaniu czynności, w które zaangażowane są głównie kończyny górne, a w szczególności pracą powtarzalną (praca operatorów pulpitów sterowniczych, praca przy taśmie, praca kasjera w supermarkcie itp.), co daje możliwość wyznaczenia obciążenia kończyny górnej. Zawiera także moduły dotyczące czynności określanymi mianem ręcznego transportu ładunków (ciągnięcie, pchanie, podnoszenie i przenoszenie), na podstawie których można wyznaczyć wartość maksymalną siły w danych warunkach pracy.

Opis programu LIMB

Program LIMB składa się z dwóch części – *Ręczny transport ładunków* oraz *Praca kończyn górnych*. W każdej z tych części występuje podział na moduły.

Część Ręczny transport ładunków

Część ta umożliwia obliczenie dopuszczalnej siły, przy wykonywaniu czynności, w których jest zaangażowane całe ciało, w zależności od wartości parametrów opisujących warunki pracy. W części tej wyróżniono następujące moduły: *Podnoszenie*, *Ciągnięcie* i *Pchanie*.

Moduł Podnoszenie

W przypadku czynności podnoszenia i przenoszenia dużych przedmiotów, dominującym czynnikiem obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego jest siła wywierana przez pracownika. Dlatego też, dla tego właśnie parametru określono jako graniczne, dopuszczalne wartości w zależności od pozycji ciała i częstości powtórzeń czynności pracy. Siła (wartość graniczna podnoszonej masy) jest wyznaczana na podstawie zależności matematycznej określonej mianem zależności NIOSH [1, 2, 5]. W celu obliczania wartości dopuszczalnej masy konieczne jest wprowadzenie wartości następujących parametrów:

H – odległość pozioma rąk od punktu środkowego między kostkami stawów skokowych, w cm

V – odległość pionowa rąk od podłogi, w cm

D – przemieszczenie w płaszczyźnie pionowej, w cm

A – kąt asymetrii – kątowe przemieszczenie ciężaru z płaszczyzny strzałkowej, w stopniach

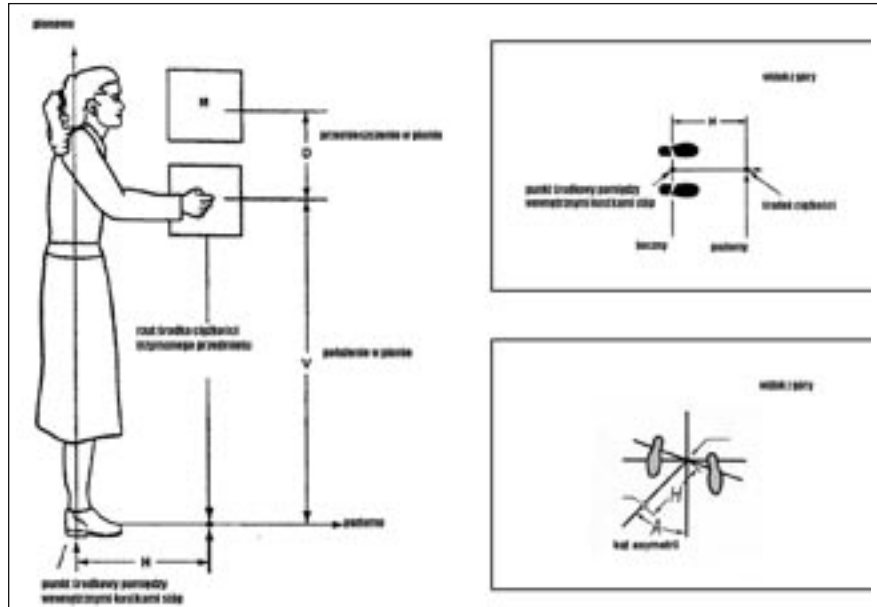
F – średnia częstość podnoszenia, mierzona na minutę (rys. 1).

Parametry H, V, D i A opisują pozycję ciała pracownika podczas podnoszenia. Parametr F związany jest z częstością powtórzeń. Dodatkowo określana jest jakość chwytu podnoszonego przedmiotu oraz czas trwania pracy (rys. 2.).

Moduły Ciągnięcie i Pchanie

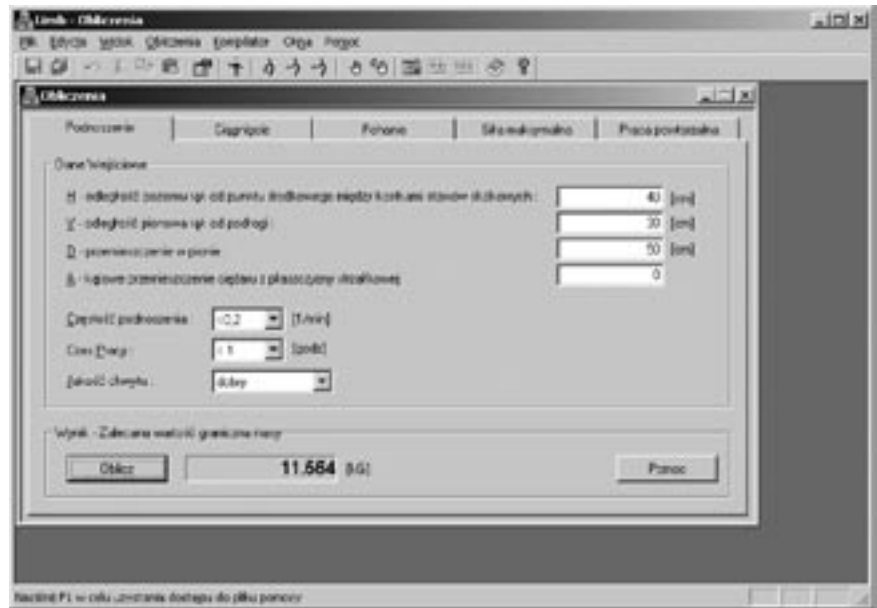
Innym rodzajem czynności pracy związanych z ręcznym transportem ładunków i wymagających wywierania dużych wartości sił jest ciągnięcie i pchanie.

W przypadku tych czynności pracy na obciążenie układu mięśniowo-szkieletowego ma wpływ wartość siły pchania lub ciągnięcia, częstość powtarzania czynności, pozycja ciała oraz odległość na jaką przedmiot jest przemieszczany. Pozycja ciała uzależniona jest w głównej mierze od wysokości położenia uchwytu



Rys. 1. Schematy przedstawiające parametry HVDiA opisujące pozycję ciała pracownika podczas czynności podnoszenia

Fig. 1. Flowcharts which present HVDiA parameters describing a worker's posture during lifting



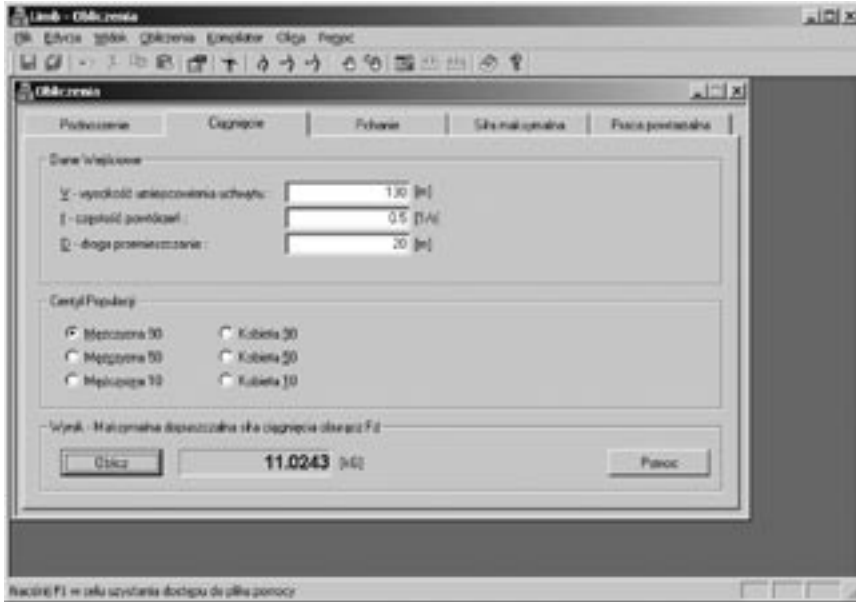
Rys. 2. Okno obliczeniowe dla modułu Podnoszenie

Fig. 2. The window in which parameters of the Lifting module are calculated

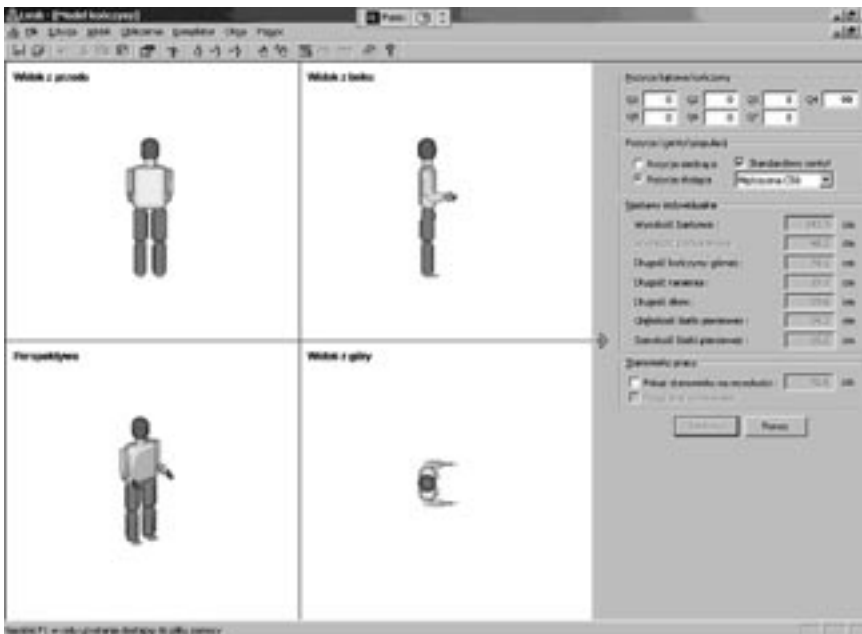
(punktu przyłożenia siły), w zależności od wysokości ciała pracownika oraz odległości stóp od ciągniętego lub pchanego przedmiotu. W związku z tym, w przypadku ciągnięcia i pchania parametrami wprowadzanymi do programu jest wysokość umiejscowienia uchwytu (V), częstość powtórzeń (f) oraz droga przemieszczania (D). Ze względu na zależność pozycji ciała pracownika zarówno od wysokości

umiejscowienia uchwytu, jak i wymiarów antropometrycznych obliczenia są przeprowadzane dla 10., 50. i 90. centyla kobiet lub mężczyzn [2] (rys. 3.).

Wartości uzyskane w wyniku obliczeń prezentują siłę oburęcznego ciągnięcia lub pchania konieczną do przemieszczenia przedmiotu, są to zalecane wartości dopuszczalne, tzn. takie, które nie mogą być przekraczane podczas pracy.



Rys. 3. Okno obliczeniowe w module Ciężnienie
 Fig. 3. The window in which parameters of the Pulling module are calculated



Rys. 4. Okno ilustrujące położenie kończyny górnej określane za pomocą kątów ($q_1 = q_2 = q_3 = 0^\circ$, $q_4 = 90^\circ$, $q_5 = q_6 = q_7 = 0^\circ$)
 Fig. 4. The window in which posture of the upper limb is presented with angles ($q_1 = q_2 = q_3 = 0^\circ$, $q_4 = 90^\circ$, $q_5 = q_6 = q_7 = 0^\circ$)

Część Praca kończyn górnych

Część ta dotyczy takich czynności, w których zaangażowane są głównie kończyny górne, a obliczenia są przeprowadzane z wykorzystaniem *Modelu pracy powtarzalnej*. Część ta składa się z dwóch

modułów: *Siła maksymalna* oraz *Praca powtarzalna*.

W module *Siła maksymalna* obliczana jest wartość maksymalna siły przy dowolnym położeniu kończyny górnej i dla ośmiu typów aktywności (pchanie,

podnoszenie, nawracanie, odwracanie, ścisk ręki, chwyt palcowy, chwyt boczny, chwyt szczypcowy).

Moduł ten umożliwia zatem wyznaczenie wartości maksymalnej siły podstawowych typów aktywności siłowej w odniesieniu do dowolnie wybranego położenia kończyny górnej, opisywanego za pomocą siedmiu kątów. Obliczenie siły maksymalnej następuje z wykorzystaniem określonych zależności matematycznych, oddzielnie w odniesieniu do każdego typu siły.

Moduł *Praca powtarzalna*, na podstawie obliczeń przeprowadzanych z wykorzystaniem modelu pracy powtarzalnej, dostarcza wartości wskaźników obciążenia kończyny górnej wynikających z wykonywania pracy opisanego wartościami określonych parametrów.

Moduł ten umożliwia zatem wyznaczenie wskaźników obciążenia kończyny górnej w funkcji parametrów określających pracę powtarzalną i odnoszących się do położenia kończyny górnej, wywieranej siły i sekwencji czasowych.

Położenie kończyny górnej

W celu określenia, w sposób jednoznaczny, położenia kończyny górnej w przestrzeni pracy przyjęto model przestrzennego położenia kończyny górnej. Model składa się z trzech sztywnych członów odpowiadających ramieniu, przedramieniu i ręce [4c]. Położenie kończyny górnej jest opisane za pomocą 7 kątów określających jednocześnie odchylenie kończyny od położenia neutralnego w formie zginania, prostowania, odwodzenia, przywodzenia oraz nawracania i odwracania. Wartości zerowe wszystkich kątów określających położenie kończyny górnej występują w położeniu naturalnym kończyny, tj. położeniu podczas pozycji ciała „na baczność”.

Aby lepiej uzmysłowić użytkownikowi sposób interpretacji tych kątów i poprawić sposób prezentacji wyników, w programie zaimplementowano model człowieka, w którym położenie kończyny górnej może być sterowane przez podawanie wspomnianych wartości kątów oraz uzupełniających wartości miar antropometrycznych. Położenie kończyny górnej można monitorować w okienku, gdzie jest rysowany model człowieka z kończyną górną w położeniu określonym przez wartości siedmiu kątów (rys. 4.).

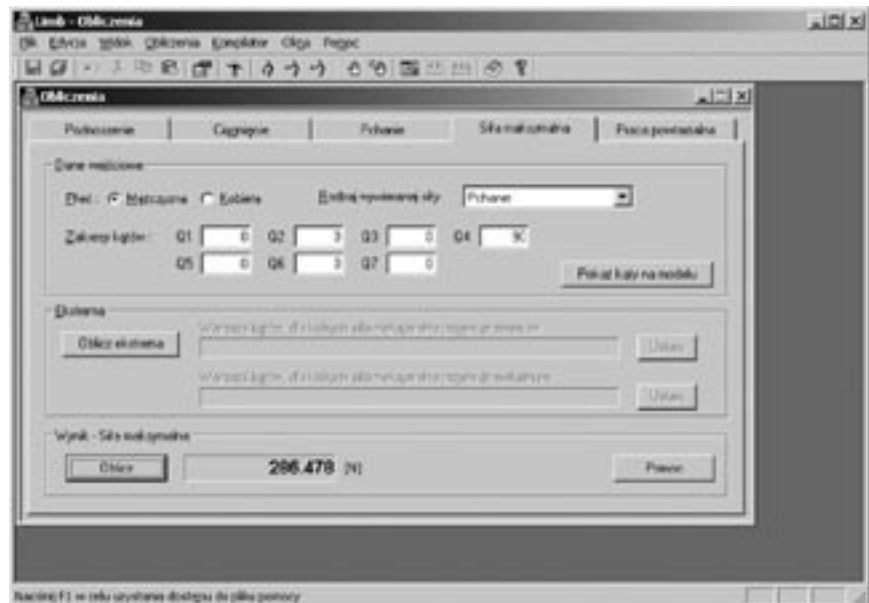
Przyjęto, że zginanie i prostowanie jest określane tym samym kątem, przy czym ruch zginania jest opisywany jako zwrot dodatni, ruch prostowania natomiast jako zwrot ujemny. Podobnie odwodzenie i przywodzenie oraz nawracanie i odwracanie.

Kąt przywodzenia/odwodzenia w stawie ramiennym, oznaczony jako q_1 , opisuje ruch odbywający się w płaszczyźnie poprzecznej, przy kącie zgięcia ramienia wynoszącym 90° , od -45° (ramię skierowane do osi ciała) do 90° (ramię skierowane od osi ciała). Natomiast kąt q_2 , będący kątem prostowania/zginania ramienia, opisuje ruch w płaszczyźnie strzałkowej od 0° (ramię opuszczone pionowo do dołu) do 180° (ramię podniesione pionowo do góry). Obrót wokół osi ramienia (nawracania/odwracanie), opisywany przez kąt q_3 , oznacza ruch od -60° (przy zgiętej w łokciu kończynie górnej przedramię skierowane do linii środkowej ciała) do 45° (przy zgiętej w łokciu kończynie górnej przedramię skierowane na zewnątrz ciała). Ruch w stawie łokciowym opisywany jest przez kąt zginania q_4 , o zakresie od 0° (wyprost w łokciu, ramię i przedramię tworzą linię prostą) do 135° (maksymalne zgięcie kończyny górnej w łokciu) oraz kąt obrotu (nawracania/odwracanie) q_5 , o zakresie od -80° (dłoń zgięta w łokciu kończyny skierowana poziomo wewnątrz do dołu) do 90° (dłoń zgięta w łokciu kończyny skierowana poziomo wewnątrz ku górze). W stawie promieniowo-nadgarstkowym odwodzenie/przywodzenie opisane kątem q_6 , odbywa się od -40° (kąt pomiędzy osią przedramienia i osią ręki, gdy ręka jest skierowana w stronę małego palca) do 30° (kąt pomiędzy osią przedramienia i osią ręki, gdy ręka jest skierowana w stronę kciuka), natomiast zginanie/prostowanie (q_7) od -70° (kąt pomiędzy zewnętrzną płaszczyzną ręki a przedramieniem) do 65° (kąt pomiędzy wewnętrzną płaszczyzną ręki a przedramieniem).

Użytkownik ma możliwość wyboru dla modelu pozycji stojącej lub siedzącej oraz jednego ze standardowych centyli populacji, które zadecydują o wartościach miar antropometrycznych (rys. 4.). Istnieje również możliwość podania indywidualnych wartości wymiarów antropometrycznych. W ten sposób użytkownik uzyska odzwierciedlenie rzeczywistej pracy wykonanej przez osobę o parametrach wybranych dla danego modelu.

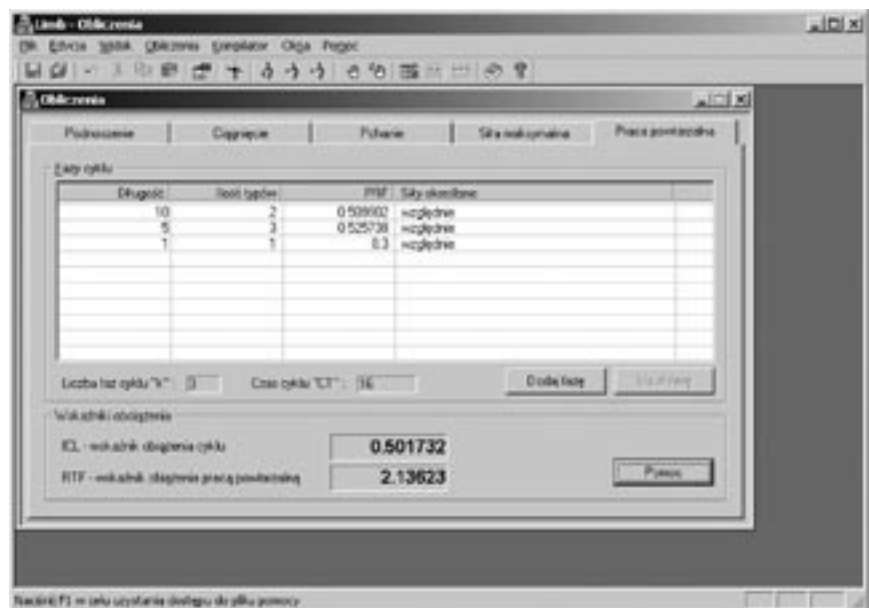
Parametry charakteryzujące możliwości siłowe kończyny górnej

Określenia podstawowych typów aktywności siłowej kończyny górnej uwzględnianych w modelu dokonano na podstawie analizy typowych, najczęściej występujących czynności podczas pracy. Do tych podstawowych typów zaliczono ścisk dłoni, chwyt palcami (chwyt szczypcowy, chwyt palcowy, chwyt boczny), siłę pchania, siłę



Rys. 5. Okno obliczeniowe modułu *Siła maksymalna* (obliczono siłę pchania kończyny górnej w położeniu opisanym kątami: $q_1=q_2=q_3=0^\circ$, $q_4=90^\circ$, $q_5=q_6=q_7=0^\circ$)

Fig. 5. The window in which parameters of the Maximum force module are calculated (Maximum force of pushing is calculated when the upper limb angles are as follows: $q_1=q_2=q_3=0^\circ$, $q_4=90^\circ$, $q_5=q_6=q_7=0^\circ$)



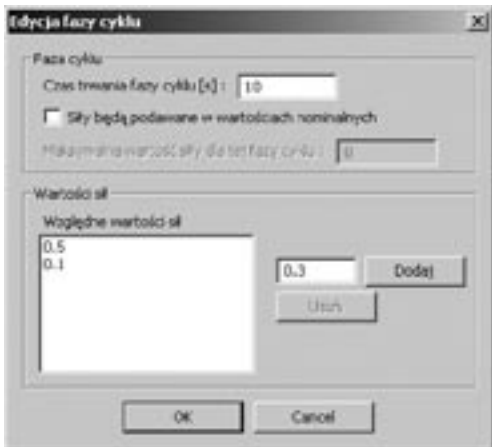
Rys. 6. Okno dialogowe w module *Praca powtarzalna*

Fig. 6. A dialog window in the Repetitive work module

podnoszenia, moment siły nawracania oraz moment siły odwracania. Uwzględniono również siłę utrzymywania kończyny górnej w określonym położeniu i siłę chwytu przedmiotu wynikającą z jego ciężaru.

Siła wywierana podczas wykonywania określonych czynności podczas pracy, odnoszona do możliwości siłowych

pracownika (siły maksymalnej), stanowi w *Modelu pracy powtarzalnej* parametr siły określonej fazy cyklu pracy. Siła maksymalna zależy od wielu czynników. Jednym z najbardziej istotnych i mających bezpośredni wpływ na wartość wywieranej siły jest położenie poszczególnych członów kończyny górnej. Dlatego też w mo-



Rys. 7. Okno dialogowe wprowadzania wartości poszczególnych typów sił składających się na siłę fazy cyklu pracy

Fig. 7. The dialog window in which the component values of forces of a phase cycle work are input

delu wartości siły są wyrażone w funkcji wartości siedmiu kątów określających położenie kończyny.

W module *Siła maksymalna* jest wybierany jeden z typów aktywności siłowych, a następnie za pomocą wartości siedmiu kątów jest określone położenie kończyny górnej, przy którym jest wyznaczana wartość maksymalna tej siły (rys. 5.).

Funkcjonalnością uzupełniającą obliczenia w module *Siła maksymalna* jest wyszukiwanie ekstremów, czyli położenia kończyny górnej, dla których występuje największa i najmniejsza wartość siły. Przycisk „oblicz ekstrema” uruchamia algorytm. Po zakończeniu cyklu obliczeniowego, w polach zostaną wyświetlone wartości kątów od q_1 do q_7 , dla których znaleziono minimum i maksimum siły określonego typu.

Parametry pracy powtarzalnej i wskaźniki obciążenia kończyny górnej

Praca powtarzalna jest charakteryzowana przez parametry odnoszące się do położenia kończyny górnej, wywieranej siły i charakterystyki czasowej. W *Modelu pracy powtarzalnej* charakterystykę czasową pracy określa czas cyklu, czas poszczególnych faz cyklu oraz liczba faz cyklu.

Zwyczaj czynności pracy zawierają w sobie kilka typów aktywności siłowych, wykonywanych w tym samym czasie.

Przykładowo, użytkowanie wiertarki stwarza dla operatora konieczność wywierania siły będącej wypadkową takich sił składowych, jak pchanie wymagane do wywiercenia otworu, siła podnoszenia związana z masą narzędzia, siła chwytu konieczna do utrzymywania narzędzia oraz siła wymagana do utrzymania ciężaru kończyny górnej w danym położeniu. W związku z tym należy przyjąć, że każda faza cyklu pracy jest charakteryzowana przez wartość siły, będącą funkcją wartości sił składowych.

Parametry charakteryzujące wykonywaną pracę powtarzalną są wprowadzane w oknie dialogowym. Na dane wejściowe składają się: czas (długość) fazy cyklu oraz liczba typów siły wchodząca w skład siły fazy cyklu (liczba typów). Pierwszym krokiem w działaniach zmierzających do wyznaczenia obciążenia kończyny górnej podczas danej pracy powtarzalnej, jest wprowadzenie wartości siły występującej podczas określonej fazy cyklu pracy (rys. 6.). Wartości siły mogą w programie zostać podane jako wartości bezwzględne lub od razu jako wartości względne odniesione do siły maksymalnej. Dodawanie i edycja sił kolejnych typów aktywności w pojedynczej fazie cyklu odbywa się w modalnym oknie dialogowym (rys. 7.).

Po wprowadzeniu wartości wszystkich sił występujących w danej fazie cyklu (wymagane jest podanie co najmniej jednej wartości) należy zatwierdzić całą fazę obliczeń przyciskiem OK. Obliczona zostanie siła względna fazy cyklu (PRF) i odpowiednie dane zostaną albo dodane, albo zmodyfikowane. Automatycznie zostaną także przeliczone dwa główne wskaźniki obciążenia kończyny górnej – wskaźnik obciążenia cyklu (ICL) oraz wskaźnik obciążenia pracą powtarzalną (RTF).

Wskaźnik obciążenia cyklu jest wskaźnikiem obciążenia zewnętrznego, wynikającego z wykonywania określonych czynności pracy podczas jednego cyklu o dowolnej długości [4]. Wpływ czasu trwania cyklu na obciążenie kończyny górnej, w szerszym zakresie niż wskaźnik obciążenia cyklu, uwzględnia wskaźnik obciążenia pracą powtarzalną. We wskaźniku obciążenia pracą powtarzalną uwzględniono zróżnicowanie obciążenia nie tylko ze względu na długość cyklu, ale także ze względu na liczbę faz cyklu.

Podsumowanie

Program komputerowy LIMB umożliwia optymalizację obciążenia układu mięśniowo-szkieletowego w czasie wykonywania różnego typu czynności pracy z przeznaczeniem zarówno dla inżynierów bezpieczeństwa pracy i projektantów, jak i dla badaczy. Program charakteryzuje się łatwością obsługi, a ponadto jest wyposażony w obszerny opis poszczególnych modułów w oknie opisu poszerza krąg odbiorców programu.

Konstrukcja programu pozwala na łatwą zmianę wprowadzonych zależności, co pozwoli na aktualizację danych, wraz z pojawiającymi się nowymi danymi, które będą mogły być uwzględnione do modyfikacji opracowanych zależności matematycznych.

Szczególnie istotnym elementem programu jest model pracy powtarzalnej, który opisuje kompleksowo parametry charakteryzujące obciążenie zewnętrzne wynikające z wykonywania czynności pracy. Model ten umożliwia zarówno opis parametrów będących przyczyną obciążenia kończyny górnej, jak i parametrów będących wskaźnikami tego obciążenia.

Stosowanie oceny obciążenia z wykorzystaniem przedstawionego programu jest możliwe nie tylko w odniesieniu do istniejących stanowisk pracy, ale także do stanowisk projektowanych. Opracowane wskaźniki obciążenia kończyny górnej (wskaźnik obciążenia cyklu i wskaźnik obciążenia pracą powtarzalną) dają możliwość rozważenia różnych procesów pracy i na podstawie uzyskanych wartości ICL oraz RTF wybór takiego, który jest dla pracownika najmniej obciążający.

Program jest dostępny w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Konarska M. *Metodyka obliczania zalecanych wartości masy podnoszonych ciężarów*. „Bezpieczeństwo Pracy” 1/1996, 6-11
- [2] Stover H.S., Carriello V.M. *The design of manual handling tasks: revised tables of maximum acceptable weights and forces*. „Ergonomics”. 1991, 34, 9, 1197-1213
- [3] Mital A., Nicholson A.S., Ayoub M.M. *A guide to Manual Materials Handling*, 1993, Taylor&Francis, London 1993
- [4] Roman-Liu D. *Analiza biomechaniczna pracy powtarzalnej*. CIOP-PIB, Warszawa 2003
- [5] Roman D. *Obliczanie zalecanych wartości masy podnoszonych ciężarów*. „Bezpieczeństwo Pracy” 7-8/1996, 19-21