



PRZYKŁADY STATYSTYCZNEJ ANALIZY WYNIKÓW BADAŃ NAD WYDOLNOŚCIĄ FIZYCZNĄ CZŁOWIEKA

Janusz Wątroba

Akademia Wychowania Fizycznego w Krakowie, Zakład Antropomotoryki; StatSoft Polska Sp. z o.o.

Jerzy A. Żołądź

Akademia Wychowania Fizycznego w Krakowie, Zakład Fizjologii Mięśni

Przykład zastosowania analizy wariancji (ANOVA)

Dla zilustrowania przykładu zastosowania dwuczynnikowej ANOVA w eksperymencie z dziedziny fizjologii wysiłku wykorzystano wybrane wyniki badań opublikowane w całości w pracy autorów: Żołądź, J. A., Duda, K., Majerczak, J. (1998) *VO₂/Power Output Relationship and the Slow Component of Oxygen Uptake Kinetics During Cycling at Different Pedaling Rates: Relationship to Venous Lactate Accumulation and Blood Acid-Base Balance*. *Physiol. Res.* 47, 427-438.

Wprowadzenie

Pomiar poboru tlenu (VO₂) oraz stężenia mleczanów we krwi [La]_b w wysiłkach o stopniowo wzrastającej intensywności jest powszechnie uznanym sposobem oceny wydolności fizycznej człowieka. W próbach wysiłkowych z wykorzystaniem cykloergometrów najczęściej stosowanym rytmem pedałowania jest około 60-70 obr.·min⁻¹ (Astrand i Rodahl, 1986). Z drugiej strony wiadomo, że nawet w długotrwałych wysiłkach fizycznych kolarze stosują wyższe rytmy pedałowania (około 100 obr.·min⁻¹). Mało jednakże wiadomo na temat wpływu wzrostu rytmu pedałowania (przy zachowaniu tej samej wielkości generowanej mocy) na koszt energetyczny wysiłku oraz stężenie mleczanów we krwi.

Celem eksperymentu było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, czy stężenie mleczanów we krwi w 6-minutowych wysiłkach o stałej mocy, odpowiadającej wielkości 50% VO₂max uzyskanej na cykloergometrze w wysiłku stopniowanym z rytmem pedałowania 70 obr.·min⁻¹, zmienia się wraz ze wzrostem rytmu pedałowania.



Opis eksperymentu

Sześciu młodych, zdrowych mężczyzn wykonało pięć 6-minutowych wysiłków z różnym rytmem pedałowania: 40, 60, 80, 100 i 120 obr. \cdot min⁻¹. Wielkość generowanej mocy była stała i odpowiadała 50% VO₂max, uzyskanej podczas testu o stopniowo wzrastającej intensywności z rytmem pedałowania 70 obr. \cdot min⁻¹. Wysiłki wykonano z co najmniej trzydniową przerwą pomiędzy każdym z nich. Podczas wysiłku rejestrowano parametry wymiany gazowej przy użyciu aparatu Oxycon Champion (Jaeger, Germany) oraz stężenie mleczanów w próbkach krwi żyłnej pobieranych przed wysiłkiem oraz w każdej minucie 6-minutowego wysiłku.

Dla potrzeb niniejszej prezentacji przedstawiono stężenia mleczanów uzyskane podczas wysiłków wykonanych w rytmie 40, 80 i 120 obr. \cdot min⁻¹.

Analiza danych

Do statystycznego opracowania wyników badań wykorzystano układ dwuczynnikowej analizy wariancji z powtarzanymi pomiarami. Pierwszy czynnik (*Obroty*) działał na trzech poziomach odpowiadających stosowanym w eksperymencie rytmom pedałowania (40, 80 i 120 obr. \cdot min⁻¹). Drugi czynnik (*Minuty*) obejmował siedem poziomów (stężenia mlecza-nów w kolejnych minutach wysiłku: 0, 1, 2, 3, 4, 5 i 6). Wszystkie obliczenia zostały wykonane w programie *STATISTICA* za pomocą opcji dostępnych w module *Ogólne modele liniowe*.

Dla potrzeb analizy wariancji z dwoma czynnikami powtarzanych pomiarów plik danych musi mieć odpowiednią strukturę. Najpierw należy umieścić w nim zmienne zawierające wyniki dla kolejnych poziomów drugiego czynnika powtarzanych pomiarów (*Minuty*), odpowiadające pierwszemu poziomowi pierwszego czynnika powtarzanych pomiarów (*Obroty*). Następnie umieszczamy zmienne zawierające wyniki dla kolejnych poziomów drugiego czynnika powtarzanych pomiarów (*Minuty*), odpowiadające drugiemu poziomowi pierwszego czynnika powtarzanych pomiarów itd.

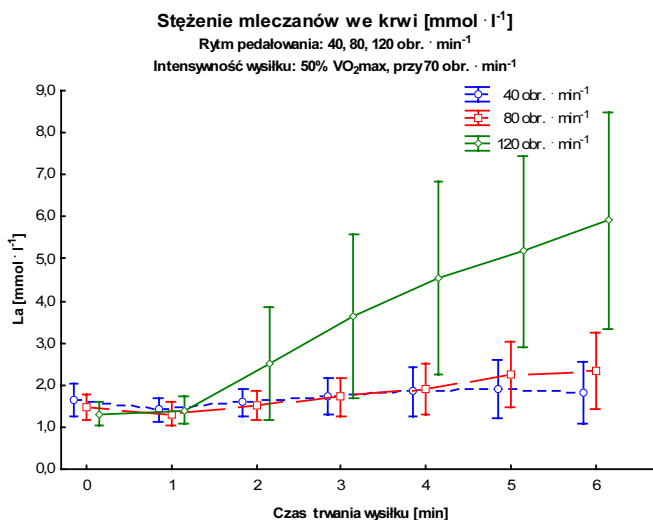
Poniżej zamieszczono fragment arkusza danych, który zawiera wyniki badań.

Dane: Mleczany dane.sta (21 zm. * 6 prz.)									
Wyniki pomiarów stężenia mleczanów w osoczu krwi w 6-minutowych wysiłkach o stałej mocy (odpowiadającej wielkości 50% VO ₂ max uzyskanej na cykloergometrze w wysiłku stopniowanym, z rytmem pedałowania 70 obr./min). Zastosowano trzy rytmy pedałowania: 40, 80 i 120 obr./min.									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Obr40-Min0	Obr40-Min1	Obr40-Min2	Obr40-Min3	Obr40-Min4	Obr40-Min5	Obr40-Min6	Obr80-Min0	Obr80-Min1
S.T.	2,0	1,6	1,7	1,8	2,1	2,2	2,1	1,5	1,
N.M.	1,5	1,3	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6	1,7	1,
K.A.	1,5	1,6	1,9	2,1	2,2	1,9	1,7	1,8	1,
CH.M.	1,6	1,7	1,9	2,3	2,6	3,0	3,1	1,5	1,
B.K.	2,1	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,3	1,
D.G.	1,1	1,0	1,2	1,3	1,3	1,4	1,4	1,0	0,

Po zdefiniowaniu analizy (wykorzystujemy pozycje: *Zaawansowane modele liniowe i nieliniowe*, *Ogólne modele liniowe* oraz *Układy z powtarzaniem pomiarów*, dostępne w menu *Statystyka*) możemy przejść do przeglądania wyników. Na początku prześledzimy poziom średnich stężeń mleczanów w kolejnych minutach wysiłku i przy zadanych w eksperymencie trzech rytmach pedałowania. Zamieszczona poniżej tabela zawiera średnie, odpowiadające im błędy standardowe oraz 95% przedziały ufności dla średnich.

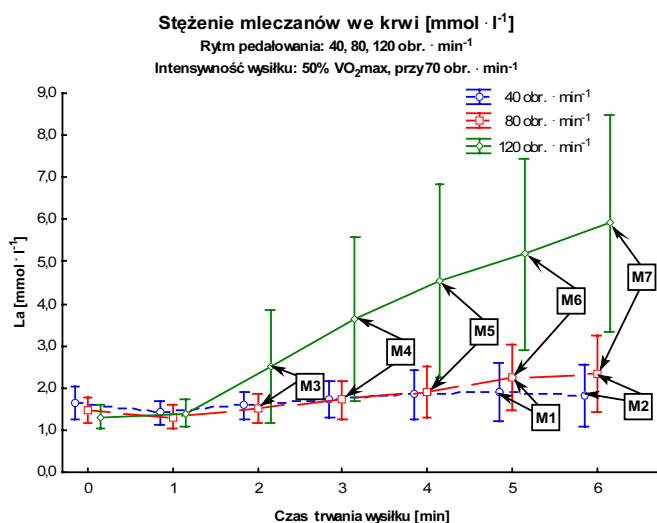
OBROTY*MINUTY; Oczekiwane średnie brzegowe (Mleczany dane.sta)							
Bieżący efekt: F(12, 60)=16,406, p=.00000							
Dekompozycja efektywnych hipotez							
Nr podkl.	OBROTY	MINUTY	Stęż. mlecz. Średnie	Stęż. mlecz. Bł. Std.	Stęż. mlecz. -95,00%	Stęż. mlecz. +95,00%	N
1	40	0	1,633333	0,149815	1,248222	2,018444	6
2	40	1	1,416667	0,107755	1,139674	1,693659	6
3	40	2	1,583333	0,122247	1,269086	1,897580	6
4	40	3	1,733333	0,168655	1,299792	2,166874	6
5	40	4	1,850000	0,223234	1,276169	2,423841	6
6	40	5	1,900000	0,263312	1,223134	2,576866	6
7	40	6	1,833333	0,287131	1,095239	2,571428	6
8	80	0	1,466667	0,117379	1,164935	1,768398	6
9	80	1	1,316667	0,107755	1,039674	1,593659	6
10	80	2	1,500000	0,134164	1,155120	1,844880	6
11	80	3	1,716667	0,177795	1,259630	2,173704	6
12	80	4	1,916667	0,238630	1,303248	2,530086	6
13	80	5	2,233333	0,302948	1,454579	3,012087	6
14	80	6	2,333333	0,357460	1,414453	3,252214	6
15	120	0	1,316667	0,107755	1,039674	1,593659	6
16	120	1	1,400000	0,123828	1,081690	1,718310	6
17	120	2	2,500000	0,525991	1,147897	3,852103	6
18	120	3	3,633333	0,750851	1,703208	5,563458	6
19	120	4	4,550000	0,894707	2,250083	6,849917	6
20	120	5	5,183333	0,882201	2,915665	7,451102	6
21	120	6	5,916667	1,005789	3,331204	8,502129	6

Dla zilustrowania występujących prawidłowości przedstawimy średnie na wykresie. Wykres ten (po odpowiedniej edycji tytułu, opisów osi itp.) został zamieszczony poniżej.



Analiza wartości średnich stężeń mleczanów w kolejnych wysiłkach pozwala stwierdzić, że przy rytmie pedałowania $80 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ nastąpił pewien, jednakże nieistotny statystycznie ($p > 0,05$), ich wzrost w 5 i 6 minucie wysiłku (w porównaniu z odpowiednimi średnimi dla rytmu pedałowania wynoszącego $40 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$). Zdecydowanie wyraźny i istotny statystycznie ($p < 0,05$) wzrost stężenia mleczanów wystąpił przy rytmie pedałowania $120 \text{ obr} \cdot \text{min}^{-1}$ (poczynając od 2 minuty wysiłku).

W dalszej części analizy ocenimy statystyczną istotność zróżnicowania odpowiednich średnich. Ponieważ nie będą nas interesowały wszystkie możliwe różnice, więc nie zastosujemy testowania istotności wszystkich możliwych różnic, lecz zastosujemy strategię testowania porównań zaplanowanych. Interesujące nas różnice zostały zaznaczone na poniższym wykresie.



Do przeprowadzania porównań tego typu w programie *STATISTICA* służy specjalna opcja *Porównania zaplanowane*. Możemy przy tym w wygodny sposób zdefiniować większą ilość porównań. Do tego celu wykorzystujemy współczynniki kontrastów. Przy ich określaniu należy kierować się kilkoma regułami. Zazwyczaj współczynniki są niedużymi liczbami całkowitymi. Suma współczynników musi wynosić zero, a porównywane komórki mają współczynniki o przeciwnych znakach. Dla komórek, które mają zostać połączone, wprowadzamy współczynniki 1. Poniżej w arkuszu zostały one przedstawione dla interesujących nas par średnich.

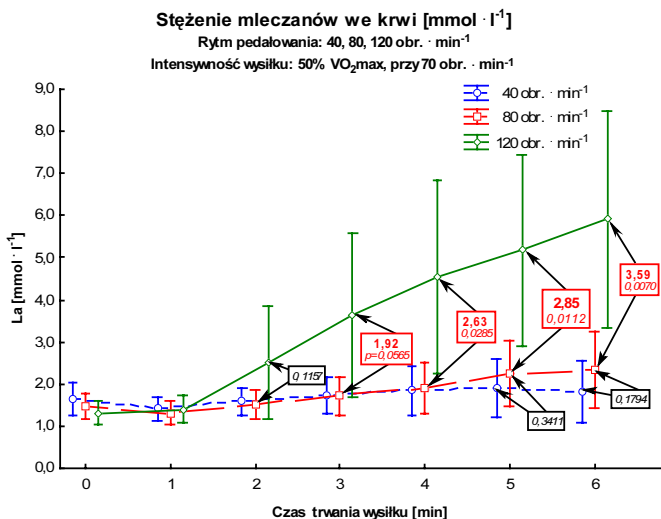


Zm. zal.	Współczynniki kontrastów dla						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
Obr40-Min0	0	0	0	0	0	0	0
Obr40-Min1	0	0	0	0	0	0	0
Obr40-Min2	0	0	0	0	0	0	0
Obr40-Min3	0	0	0	0	0	0	0
Obr40-Min4	0	0	0	0	0	0	0
Obr40-Min5	1	0	0	0	0	0	0
Obr40-Min6	0	1	0	0	0	0	0
Obr80-Min0	0	0	0	0	0	0	0
Obr80-Min1	0	0	0	0	0	0	0
Obr80-Min2	0	0	1	0	0	0	0
Obr80-Min3	0	0	0	1	0	0	0
Obr80-Min4	0	0	0	0	1	0	0
Obr80-Min5	-1	0	0	0	0	1	0
Obr80-Min6	0	-1	0	0	0	0	1
Obr120-Min0	0	0	0	0	0	0	0
Obr120-Min1	0	0	0	0	0	0	0
Obr120-Min2	0	0	-1	0	0	0	0
Obr120-Min3	0	0	0	-1	0	0	0
Obr120-Min4	0	0	0	0	-1	0	0
Obr120-Min5	0	0	0	0	0	-1	0
Obr120-Min6	0	0	0	0	0	0	-1

Fragment wyników testowania istotności różnic przedstawia zamieszczony poniżej arkusz.

Kontrast	Oceny kontrastów (Mleczany dane.sta)											
	Oceny kontrastów dla zmiennych przekształconych											
	M1	M1	M1	M1	-95,00%	+95,00%	M2	M2	M2	M2	-95,00%	+95,00%
	Ocena	Bł. std.	t	p	Gr. ufn.	Gr. ufn.	Ocena	Bł. std.	t	p	Gr. ufn.	Gr. ufn.
Wyraz woln	-0,333333	0,316930	-1,05176	0,341062	-1,14803	0,481360	-0,500000	0,320416	-1,56047	0,179399	-1,32366	0,323657

Dla ułatwienia merytorycznej analizy uzyskanych wyników na zamieszczonym poniżej wykresie naniesiono wielkości bezwzględne wartości ocenianych różnic oraz odpowiadające im poziomy prawdopodobieństwa testowego.





Wnioski

Wykazano, że w wysiłku o stałej mocy (50% VO_2max , uzyskanego z rytmem pedałowania 70 obr. $\cdot\text{min}^{-1}$) wzrost rytmu pedałowania do wielkości 100 obr. $\cdot\text{min}^{-1}$ nie wpływał istotnie na stężenie mleczanów we krwi. Zastosowanie rytmu pedałowania 120 obr. $\cdot\text{min}^{-1}$ wywołało postępujący w czasie wzrost stężenia mleczanów. Wyniki tych badań wyjaśniają przyczynę, dla której przekraczanie rytmu pedałowania powyżej 100 obr. $\cdot\text{min}^{-1}$ w wysiłkach długotrwałych jest nieefektywne, gdyż prowadzi do akumulacji mleczanów i zmęczenia sportowca.

Przykład zastosowania analizy regresji

W celu przedstawienia możliwości analizy regresji wykorzystano niepublikowane wcześniej wyniki, pochodzące z badań własnych (Żołądź i wsp.), uzyskane w pracowni Zakładu Fizjologii Mięśni AWF w Krakowie.

Wprowadzenie

Jednym z czynników determinujących wydolność fizyczną człowieka jest koszt energetyczny wysiłku. Z licznych obserwacji wynika, że wprawdzie w wysiłkach submaksymalnych zależność pomiędzy poborem tlenu a wielkością generowanej mocy jest liniowa (Astrand i Rodahl, 1986), jednakże istnieją znaczne różnice międzypersonalne w przebiegu wzrostu poboru tlenu w funkcji mocy. Mogą one przejawiać się w postaci systematycznego „przesunięcia w górę” zależności pomiędzy poborem tlenu a mocą i/lub zróżnicowania tempa przyrostu konsumpcji tlenu w funkcji mocy. Oba zjawiska mogą mieć różne fizjologiczne podłoże. Ilościowe określenie rozmiarów tych różnic możliwe jest poprzez analizę parametrów funkcji regresji (zarówno współczynników kierunkowych, jak i wyrazów wolnych). W niniejszym opracowaniu przedstawione zostaną przykłady takiej analizy.

Zaznaczyć należy, że analiza taka stosowana może być tylko w przypadku danych uzyskanych w wysiłkach submaksymalnych, w których zależność poboru tlenu w stosunku do wielkości generowanej mocy ma charakter liniowy (Astrand i Rodahl, 1986). W wysiłkach o wysokiej intensywności, tj. przekraczających próg mleczanowy, występuje nieliniowy (nieproporcjonalny do przyrostu mocy) wzrost poboru tlenu (Żołądź i wsp., 1995; 1998a; 1998b), co uniemożliwia zastosowanie modeli regresji liniowej do opisu tej zależności.

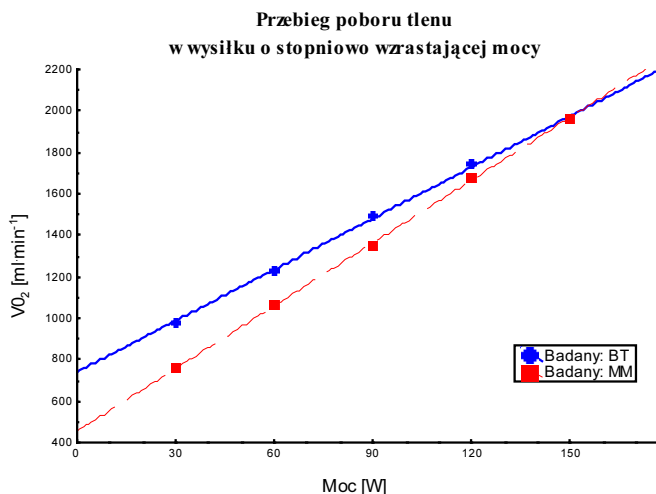
Opis eksperymentu

Wykonano próbę wysiłkową o stopniowo wzrastającej wielkości mocy na cykloergometrze Ergoline 800s. Próbę rozpoczynano 6-minutową rejestracją poboru tlenu w spoczynku, po której co trzy minuty zwiększano wielkość mocy o 30 W (patrz Żołądź i wsp., 1995;

1998a; 1998b). Wysiłek kontynuowano do zmęczenia. Rytm pedałowania wynosił 70 obr. \cdot min⁻¹. Pobór tlenu rejestrowano przy użyciu aparatu Oxycon Champion (Jaeger, Germany). Do analiz zależności pomiędzy poborem tlenu a mocą wykorzystano wielkości konsumpcji tlenu, reprezentujące średnie z każdej trzeciej (tj. ostatniej) minuty trzyminutowego obciążenia, po którym następował kolejny wzrost poziomu mocy. W niniejszym przykładzie przedstawiono wyniki badań dwóch osób, oznaczonych inicjałami BT i MM. Analizę zależności pomiędzy poborem tlenu a mocą przeprowadzono w zakresie mocy od 30 do 150 W (tj. przed przekroczeniem przez badane osoby progu mleczanowego).

Analiza danych

Do opracowania danych zastosowano techniki analizy regresji i analizy kowariancji. Jej użycie umożliwiło oszacowanie modeli regresji liniowej, opisującej wpływ zadanej mocy na poziom zużycia tlenu w przypadku wybranych osobników oraz ocenę równoległości oszacowanych linii regresji. Korzystając z możliwości graficznych programu *STATISTICA*, na poniższym wykresie przedstawiono charakter występujących współzależności.



Pierwsza część analizy została przeprowadzona za pomocą modułu *Regresja wieloraka*. Dzięki niemu uzyskujemy oceny parametrów modeli regresji liniowej. Poniżej przedstawiono wyniki dla obydwu badanych (odpowiednio *BT* i *MM*).

Badany: MM	Podsumowanie regresji zmiennej zależnej: VO ₂ (Zużycie tlenu a moc.sta)					
	R= ,99978308 R2= ,99956620 Skoryg. R2= ,99942160 F(1,3)=6912,7 p<,00000 Błąd std. estymacji: 11,528					
	BETA	Błąd st. BETA	B	Błąd st. B	t(3)	poziom p
W. wolny			454,5000	12,09091	37,59024	0,000041
Moc	0,999783	0,012025	10,1033	0,12152	83,14257	0,000004



Oszacowane przez program modele opisujące wpływ zmiennej *Moc* na zmienną VO_2 można zapisać jako:

$$\text{Badany: BT} \quad VO_2 = 8,2333 + 741,2 \cdot \text{Moc}$$

$$\text{Badany: MM} \quad VO_2 = 10,1033 + 454,5 \cdot \text{Moc}$$

Wszystkie oceny parametrów modeli są istotne statystycznie. Do oceny dobroci dopasowania modeli do danych wykorzystuje się wartości współczynników determinacji (R^2). Dla obydwu modeli ich wartości są bardzo wysokie (dla BT $R^2=0,9989$, a dla MM: $0,9996$), co świadczy o bardzo dobrym odzwierciedleniu badanych współzależności przez modele liniowe. O dobrym dopasowaniu świadczą też niskie wartości standardowych błędów estymacji (odpowiednio; 12,97 i 11,53).

W drugiej części analizy zweryfikowano prawdziwość hipotezy zakładającej, że odpowiednie współczynniki kierunkowe porównywanych modeli regresji liniowej są sobie równe (hipoteza równoległości linii regresji). W tym celu wykorzystano opcję *Model jednakowych nachyleń* dostępną w module *Ogólne modele liniowe*. Wyniki testowania tej hipotezy przedstawia poniższa tabela (w wierszu *Badany*Moc*).

Jednowymiarowe testy istotności dla VO_2 (Zużycie tlenu a moc.sta)					
Parametryzacja z sigma-ograniczeniami					
Dekompozycja efektywnych hipotez					
Efekt	SS	Stopnie swobody	MS	F	p
Wyraz wolny	649863	1	649863	4315,64	0,000000
Badany	37362	1	37362	248,12	0,000004
Moc	1513050	1	1513050	10047,93	0,000000
Badany*Moc	15736	1	15736	104,50	0,000051
Błąd	903	6	151		

Na podstawie obliczonego przez program prawdopodobieństwa testowego ($p=0,000051$) hipotezę o równości współczynników kierunkowych możemy odrzucić. Sugeruje nam to jednocześnie, że do opracowania danych należy zastosować *Model różnych nachyleń*.

Wnioski

Wyniki przedstawionej zależności pomiędzy poborem tlenu a wielkością generowanej mocy w wysiłku submaksymalnym (poniżej progu mleczanowego), jak zakładano, w przypadku obu badanych miały charakter linowy. Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników wykazała ponadto istnienie znacznych różnic w tempie przyrostu konsumpcji tlenu w funkcji mocy. W czasie generowania niskich wielkości mocy pobór tlenu u badanego MM był znacznie niższy aniżeli u badanego BT. Jednakże wraz ze wzrostem wielkości generowanej mocy pobór tlenu u badanego BT wzrastał istotnie wolniej aniżeli u badanego MM, w wyniku czego w chwili osiągnięcia mocy na poziomie 150 W wielkości poboru tlenu u obu badanych były zbliżone. Można przewidywać, że dalszy wzrost wielkości mocy doprowadzi do wyższych wielkości poboru tlenu u badanego MM, aniżeli u badanego BT.



Wyniki tych badań wykazują, że koszt energetyczny wysiłku o niskiej mocy (około 30 W) jest znacznie niższy u badanego MM aniżeli u badanego BT. W wysiłku o wyższej mocy (około 150 W) koszt energetyczny wysiłku u obu badanych jest podobny. Przedstawiony przykład analizy służyć może do oceny międzyosobniczych różnic w koszcie energetycznym w wysiłkach o zróżnicowanych wielkościach mocy

Literatura

1. Astrand, P.O., Rodahl, K. (1986) *Textbook of Work Physiology*, McGraw-Hill, New York.
2. StatSoft, Inc. (2003) *STATISTICA* (data analysis software system), version 6. www.statsoft.com.
3. Zoladz, J.A., Rademaker, A.C., Sargeant, A.J. (1995) Non-linear relationship between O₂ uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *J. Physiol. (London)* 488, 211-217.
4. Zoladz, J.A., Duda, K., Majerczak, J. (1998) VO₂/Power Output Relationship and the Slow Component of Oxygen Uptake Kinetics During Cycling at Different Pedaling Rates: Relationship to Venous Lactate Accumulation and Blood Acid-Base Balance. *Physiol. Res.* 47, 427-438.
5. Zoladz, J. A., Duda, K., Majerczak, J. (1998a) Oxygen uptake does not increase linearly at high power outputs during incremental exercise test in humans. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 77, 445-451.
6. Zoladz, J. A., Szkutnik Z., Majerczak J., Duda K. (1998b) Detection of the change point in oxygen uptake during an incremental exercise test using recursive residuals: relationship to the plasma lactate accumulation and blood acid base balance. *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.* 78, 369-377.