

doi:10.15199/48.2019.11.20

Szacowanie estymaty menzurandu temperatury skóry człowieka podczas próby wysiłkowej

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wyniki pomiarów temperatury skóry człowieka podczas próby wysiłkowej. Ponieważ uzyskane wyniki nie podlegają rozkładowi normalnemu, wyznaczono wartości pięciu różnych estymatorów menzurandu. Otrzymane rezultaty wykazały, że w rozważanym przypadku najlepszy estymator menzurandu otrzymujemy z metody bootstrap, ponieważ charakteryzuje się on najmniejszym odchyleniem standardowym.

Abstract. The article presents results of the skin temperature measurement during an endurance test. The resulting observations are not normally distributed, for this reason the values of five different measurand estimators were determined. The obtained results showed that in the considered case the best measurand estimator is the bootstrap method obtained, because it has the smallest standard deviation. (*Estimation of measurand of human skin temperature during the endurance test*)

Słowa kluczowe: menzurand, rozkład, estymator, CPET.

Keywords: measurand, distribution, estimator, CPET.

Wstęp

Prawidłowo wykonany pomiar wymaga, by jego wynik uzupełniony był parametrem jakościowym charakteryzującym ten pomiar, czyli oceną niedokładności [1, 2].

Ważne jest nie tylko rzetelne i sumienne wyznaczanie niepewności pomiaru, ale także staranne oszacowanie prawidłowej wartości estymatora menzurandu.

Zgodnie z przewodnikiem GUM [1] estymator menzurandu obliczany jest najczęściej, jako wartość średnia arytmetyczna wyników. Takie podejście jest słuszne przy założeniu, że obserwacje są niezależne, ich liczba jest dostatecznie duża i można je opisać rozkładem normalnym [3].

W większości analiz metrologicznych autorzy postępują zgodnie z zaleceniami przewodnika. Jeżeli obserwacje nie mają rozkładu normalnego to uzasadnionym jest stosowanie innych estymatorów menzurandów [3].

Autorzy niniejszej publikacji w poprzednich opracowaniach związanych z szacowaniem niepewności pomiaru temperatury skóry człowieka podczas próby wysiłkowej [4] postępowali zgodnie z zaleceniami podanymi w przewodniku GUM. Celem niniejszej publikacji jest analiza zasadności takiego podejścia.

Pomiar temperatury skóry człowieka

Obecnie w medycynie, w celu określenia ogólnej wydolności tlenowej organizmu człowieka, stosowane są dokładne, bezinwazyjne i bezpieczne metody pomiarowe. Jednymi z takich badań są wysiłkowe badania sercowo-płucne – CPET (ang. cardiopulmonary exercise test) [5, 6].

Badanie takie, najczęściej realizowane w formie testu spiroergometrycznego, może zostać przeprowadzone zarówno dla pacjentów cierpiących na schorzenia układu krwionośnego czy oddechowego jak również dla osób czynnie uprawiających sport i pozwala określić maksymalny pobór tlenu (VO_{2max}).

Tego typu test jest najczęściej realizowany podczas narastającego wysiłku i umożliwia uzyskanie informacji na temat zmian w stężeniach wydychanych gazów: tlenu (pO_2) i dwutlenku węgla (pCO_2), saturacji krwi tlenem (SpO_2), częstości skurczów serca (HR) i ciśnienia tętniczego krwi (BP) oraz wentylacji minutowej płuc. Istotne są wartości tych wielkości w jednostce czasu uzyskiwane podczas testu przez osobę badaną – do oszacowania mocy (WR), a także do subiektywnej oceny wysiłku (wg. skali Borga).

Ze względu na fakt, iż podczas wysiłku fizycznego następuje znaczny wzrost ilości wysokoenergetycznych

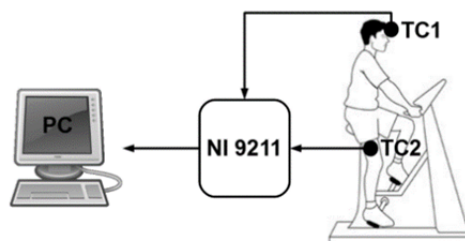
procesów metabolicznych, ogólna temperatura ciała człowieka ulega podwyższeniu i może osiągać wartości znacznie powyżej temperatury spoczynkowej. Oznacza to, iż wzrost wartości temperatury jest nie tylko oznaką zmęczenia, ale może także stanowić dodatkowy parametr diagnostyczny. Na podstawie rezultatów badań potwierdzono zależność pomiędzy parametrami spirometrycznymi (mierzonymi przy pomocy analizatora gazów), oksigenacją tkanki mózgowej (mierzona specjalizowanym urządzeniem do pomiaru w bliskiej podczerwieni) oraz temperaturą skóry w wybranych punktach ciała. Dlatego też autorzy postanowili, oprócz pomiaru podstawowych parametrów CPET, dodać pomiar temperatury.

Po dokonaniu analizy wyników uzyskanych z badań wstępnych [7], wykonanych w dwóch miejscach ciała człowieka, stwierdzono, iż system pomiarowy powinien umożliwiać realizację pomiarów temperatury z rozdzielczością, co najmniej $0,01^{\circ}C$ i częstotliwością próbkowania minimum 4 Hz w dwóch kanałach jednocześnie.

Do badań zmian wartości temperatury skóry człowieka, w wybranych punktach, wykorzystano układ składający się z 24 bitowej karty akwizycji sygnałów pomiarowych NI 9211, umożliwiającej pomiar z częstotliwością próbkowania 7 Hz w dwóch kanałach jednocześnie oraz termoelementów w płaszczu teflonowym typu T klasy 1 wyprodukowanych przez firmę Termoaparatura Wrocław.

Rozwiązanie takie pozwala na wykonywanie kontaktowych pomiarów temperatury ciała, przy zapewnieniu odpowiedniej dynamiki pomiaru i jednoczesnym ograniczeniu wpływu występowania potu na skórze człowieka na wynik.

Schemat wykonanego stanowiska badawczego został przedstawiony na rysunku 1 [4].



Rys. 1. Schemat systemu do pomiaru temperatury podczas próby wysiłkowej: TC1, TC2 – termoelementy typu T [4]

Do wizualizacji odczytanych danych wykorzystano specjalistyczną aplikację, opracowaną w środowisku programowania LabVIEW, która umożliwia wykonywanie pomiarów, a także prezentację, rejestrację oraz archiwizację danych.

Badania przeprowadzono w dwóch różnych miejscach na ciele badanego człowieka: jako T1 oznaczono umiejscowienie czujnika TC1 na czole, a jako T2 punkt pomiaru na udzie czujnikiem TC2. Próbę wysiłkową przeprowadzono na kilkunastu osobach w wieku 10-12 lat. Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki dla dwóch badanych osób.

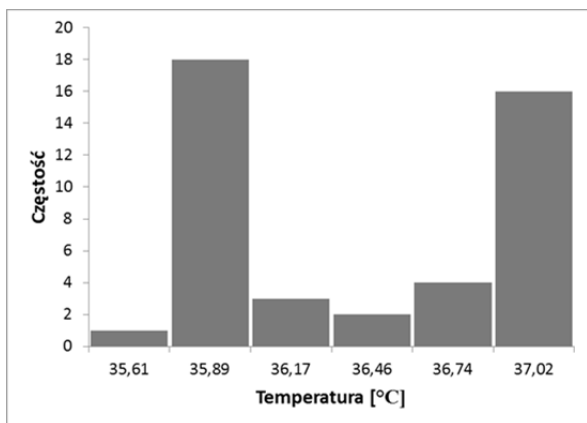
Analiza danych

Celem autorów jest poddanie analizie statystycznej wyników pomiarów uzyskanych podczas próby wysiłkowej. Wyniki tych analiz pozwalają zweryfikować, czy sposób szacowania estymaty menzurandu temperatury skóry człowieka, jako wartości średniej, czyli przy założeniu normalnego rozkładu prawdopodobieństwa jest prawidłowy.

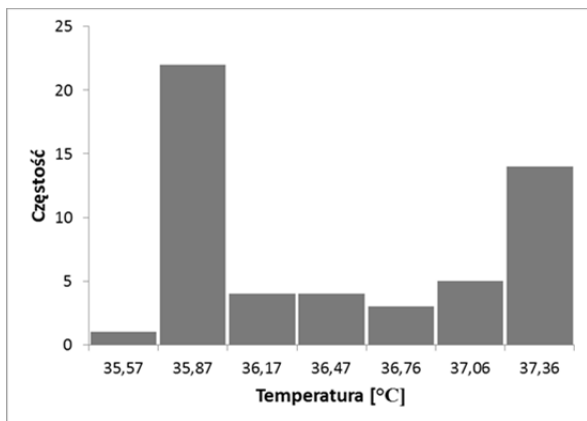
W analizie uwzględniono wyniki uzyskane tylko z czujnika TC1, odpowiednio dla 44 i 53 punktów pomiarowych.

Przeprowadzono analizę matematycznego modelu rozkładu prawdopodobieństwa obserwacji. Wykreślono histogramy złożone z wyników pomiarów, zgrupowane w $k = 6$ lub 7 klas (według formuły Sturgesa [8]) w celu weryfikacji przyjętej hipotezy rozkładu prawdopodobieństwa.

Dla badanego nr 1 szerokość interwałów wynosiła $0,28^{\circ}\text{C}$ (rys. 2).



Rys. 2 Histogram danych pomiaru temperatury T1 u badanego nr 1



Rys. 3. Histogram danych pomiaru temperatury T1 u badanego nr 2

Pomimo, że jednostką podstawową zgodnie z układem SI jest Kelvin Autorzy świadomie prezentują wyniki pomiaru w stopniach Celsjusza, ze względu na obiekt badań, jakim jest człowiek.

Dla uczestnika badań nr 2 szerokość interwałów wynosiła $0,30^{\circ}\text{C}$ (rys. 3). Dane zaprezentowane na powyższych rysunkach są różne skoncentrowane, nie są symetryczne, choć uzyskane histogramy wykazują duże podobieństwo do siebie.

Mimo, że histogramy wskazują, że nie są to rozkłady normalne, dla potwierdzenia dane eksperymentalne poddano testowi χ^2 . Przyjęto poziom istotności $\alpha = 0,05$ (niedokładność nie większą niż 5%). Wartość χ^2 została wyznaczona ze wzoru [2]:

$$(1) \quad \chi^2 = \sum_{i=0}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i}$$

gdzie: O_i - liczba wyników otrzymanych w eksperymencie i umieszczonych w odpowiednim przedziale, E_i - oczekiwana liczba wyników w danym zakresie, która została obliczona na podstawie założonego rozkładu.

Wyniki uzyskane z testu χ^2 prezentują się następująco:

- dla uczestnika 1: $\chi^2 = 270,53 > k=6$;
- dla uczestnika 2: $\chi^2 = 401,28 > k=7$.

Uzyskane rezultaty jednoznacznie potwierdziły hipotezę, że oba histogramy nie mają rozkładu normalnego. Wobec czego można się spodziewać, że wartość średnia arytmetyczna nie będzie najlepszym estymatorem menzurandu.

W związku z tym przeprowadzono dodatkowe analizy mające na celu oszacowanie wartości estymatora menzurandu. Wzięto pod uwagę estymator jednoskładnikowy, wyznaczony jako: środek rozstępu T_q , wartość średnią z dwóch najczęściej występujących temperatur \bar{T}_{2max} , medianę T_{med} oraz (dla porównania) średnią arytmetyczną \bar{T} .

Środek rozstępu T_q został obliczony zgodnie ze wzorem [3]:

$$(2) \quad T_q = \frac{T_{imax} + T_{imin}}{2}$$

gdzie T_{imax} i T_{imin} to odpowiednio maksymalna i minimalna wartość temperatury w danej obserwacji.

Uzyskane wyniki obliczeń wszystkich czterech estymatorów zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki szacowania estymatora menzurandu temperatury

Uczestnik	T_q [°C]	\bar{T}_{2max} [°C]	T_{med} [°C]	\bar{T} [°C]
1	36,314	36,456	36,187	36,255
2	36,466	36,614	36,120	36,333

W obu prezentowanych przypadkach najmniejsze wartości estymatora menzurandu temperatury otrzymano, gdy estymator ten wyznaczono, jako medianę.

Jednak ze względu na fakt, iż dla wszystkich tych estymatorów jednoelementowych odchylenie standardowe $s(T)$ ma tę samą wartość, to trudno rozstrzygnąć, który z nich jest najlepszy.

Odchylenie standardowe $s(T)$ wyznaczono zgodnie z zależnością [2]:

$$(3) \quad s(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (T_i - \bar{T})^2}{n-1}}$$

gdzie T_i – zmierzona wartość temperatury dla $i = 1, 2, \dots, n$.

Uzyskano następujące wyniki: (odpowiednio dla uczestników badań nr 1 i nr 2) $s_1(T) = 0,590^\circ\text{C}$ oraz $s_2(T) = 0,631^\circ\text{C}$.

W związku z powyższym dodatkowo wyznaczono estymator menzurandu temperatury dwoma metodami resamplingu [3], czyli powtórznego próbkowania danych próbki: jackknife T_j oraz bootstrap T_b [9].

Metoda jackknife została zaproponowana przez M.H. Quenouille w 1949 r., a następnie udoskonalona w 1956 r. przez Johna Tukeya. Metoda ta jest procedurą wtórnego próbkowania i polega na utworzeniu nowego zbioru m próbek wtórnych z danych pierwotnych poprzez usuwanie elementów (jackknife) ze zbioru pierwotnego.

Istnieją różne warianty tej metody: z usuwaniem jednej lub kilku próbek. W niniejszym artykule zastosowano pierwszy wariant tej metody.

W tym przypadku z próby $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$ otrzymano m próbek jackknife, przy czym np. i -ta z nich jest następującej postaci:

$$(4) \quad T(i) = (T_1, T_2, \dots, T_{i-1}, T_{i+1}, \dots, T_n)$$

Następnym krokiem było obliczenie estymatorów oraz odchyłeń standardowych dla m próbek wtórnych. Ostatnim krokiem jest wybór estymatora o minimalnej wartości odchylenia standardowego.

Wadą metody jackknife jest fakt, iż wymaga ona stosunkowo dużej próby danych oraz że słabo sprawuje się w przypadku danych, które nie są gładkie, ponieważ niewielka zmiana próby może powodować znaczącą zmianę wartości estymatora.

Metoda statystyczna bootstrap została opublikowana w 1979 r. przez B. Efron'a [10]. Procedura ta, w pierwszym kroku, sprowadza się do wielokrotnego losowania ze zwracaniem z pierwotnej próby wyników eksperymentalnych. W efekcie tych działań otrzymuje się m nowych zbiorów danych. Następnym etapem, podobnie jak w metodzie jackknife, jest oszacowanie wartości estymatorów i odchyłeń standardowych dla nowych zbiorów próbek. Ostatni krok jest identyczny jak w metodzie jackknife i polega na wyborze najefektywniejszego estymatora.

Zaletami tej metody jest możliwość zastosowania jej w przypadku małej próbki danych oraz w przypadku, gdy rozkład danych jest znacząco asymetryczny.

W Tabeli 2 zaprezentowano wyniki obliczeń estymatora menzurandu temperatury T_b oraz odchylenia standardowego $s_b(T)$ uzyskane (dla obu uczestników) metodą bootstrap dla 200 replikacji w programie Microsoft Excel z rozszerzeniem XLStat.

Tabela 2. Wyniki szacowania estymatora menzurandu temperatury metodami resamplingu

Uczestnik	T_j [$^\circ\text{C}$]	T_b [$^\circ\text{C}$]	$s_j(T)$ [$^\circ\text{C}$]	$s_b(T)$ [$^\circ\text{C}$]
1	36,255	36,267	0,590	0,584
2	36,333	36,326	0,631	0,625

Okazało się, że najlepszymi estymatorami (o najmniejszym odchyleniu standardowym) dla próbek z badanych populacji pomiaru temperatury skóry ciała człowieka są estymatory menzurandu otrzymane metodą bootstrap.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano obserwacje pomiaru temperatury skóry człowieka zmierzonej na czole, dla dwóch osób podczas próby wysiłkowej. Wyniki

przeprowadzonego testu zgodności χ^2 jednoznacznie wykazały, że w obu analizowanych przypadkach obserwacje nie podlegają rozkładowi normalnemu. Wobec czego wyznaczono wartości pięciu estymatorów menzurandu temperatury takich jak: środek rozstępu T_q , wartość średnia z dwóch najczęściej występujących temperatur T_{2max} , medianę T_{med} oraz dwa estymatory uzyskane metodami resamplingu: jackknife T_j oraz bootstrap T_b . Następnie w celu wyboru najlepszego estymatora oszacowano odchylenia standardowe.

Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że dla rozważanych w artykule wyników pomiaru temperatury skóry ciała człowieka są estymatory menzurandu otrzymane metodą bootstrap, ponieważ charakteryzują się one najmniejszym odchyleniem standardowym.

Mimo, że różnica pomiędzy wartościami estymatorów uzyskanych metodą bootstrap T_b a estymatorami obliczonymi, jako wartość średnia arytmetyczna \bar{T} nie jest duża, ponieważ nie przekracza 0,04%, to w przypadku pomiarów dotyczących badania trendu zmian wydolności tlenowej organizmu u człowieka czynnie uprawiającego sport może być istotna i pokazywać charakter zmian maksymalnego poboru tlenu (VO_{2max}).

W dalszych pracach autorzy planują przeprowadzenie badań dotyczących szacowania estymatora wielokrotnego menzurandu temperatury skóry ciała człowieka.

Autorzy: dr inż. Anna Golijanek-Jędrzejczyk, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: anna.golijanek-jedrzejczyk@pg.edu.pl, dr inż. Ariel Dzwonkowski, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: ariel.dzwonkowski@pg.edu.pl, dr hab. inż. Dariusz Świsulski, Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk, E-mail: dariusz.swisulski@pg.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement - JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, First edition, September 2008
- [2] Taylor J. R. Wstęp do analizy błędów pomiarowych, WN PWN, Warszawa 1995
- [3] Pomsza Z., Metody rozszerzenia analizy niepewności pomiarów, Oficyna Wydawnicza PIAP, Warszawa, 2016
- [4] Golijanek-Jędrzejczyk A., Dzwonkowski A., Rafiński L., Methodology of estimating temperature measurement uncertainty in a system for endurance tests, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, nr 55 (2017), 21-24
- [5] R. Dotan, C. Mitchell, R. Cohen, P. Klentrou, D. Gabriel, and B. Falk, Child-Adult Differences in Muscle Activation - a Review, *Pediatr Exerc Sci*, (2012), 24, 2-21
- [6] M. Łuszczek, S. Kujach, R. A. Olek, R. Laskowski, and A. Szczesna-Kaczmarek, Prefrontal cortex oxygenation and muscle oxygenation during incremental exercise in children: A near-infrared spectroscopy study, in: Armsrton N, Williams C (eds.) *Children and Exercise XXVI*, Oxford: Routledge, (2012), pp. 83-89
- [7] Rafiński L., Łuszczek M., Koncepcja systemu do pomiaru temperatury podczas prób wysiłkowych u dzieci, *Pomiary Automatyka Kontrola* vol. 59, nr 6 (2013)
- [8] Scott, D. W., Sturges' rule. *WIREs Comp Stat*, 1 (2009), 303-306, doi:10.1002/wics.35
- [9] Chernick M. R., *Bootstrap methods: a guide for practitioners and researchers*, 2nd ed., Wiley, 2007
- [10] Efron, B., Bootstrap methods: Another look at jackknife, *Ann. Stat.* 7 (1979), 1-26