Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej Nr 47

Politechnika Gdańska

Wydział Elektrotechniki i Automatyki

Gdańsk 2015

SZACOWANIE NIEPEWNOŚCI ROZSZERZONEJ POMIARU TEMPERATURY SKÓRY CZŁOWIEKA PODCZAS PRÓBY WYSIŁKOWEJ

Ariel DZWONKOWSKI[1], Anna GOLIJANEK-JĘDRZEJCZYK[2], Leszek RAFIŃSKI[3]

1. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
   tel.: 58 347-17-78 e-mail: ariel.dzwonkowski@pg.gda.pl
2. Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki
   tel.: 58 347-17-78 e-mail: anna.golijanek-jedrzejczyk@pg.gda.pl
3. Awis Sp. z o.o, Gdańsk
   tel.: 58 322-95-42 e-mail: biuro@awis.pl

Streszczenie: Zespół, składający się z autorów artykułu, opracował nową, bezinwazyjną metodę pomiaru temperatury wybranych punktów ciała człowieka podczas próby wysiłkowej. Do celów pomiaru wykorzystano czujnik termoelektryczny, który zapewnił wymaganą dokładność pomiarów dynamiki zmian temperatury skóry podczas przeprowadzania testu wysiłkowego.

W referacie zaprezentowano metodologię szacowania niepewności rozszerzonej pomiaru temperatury skóry człowieka, przy zastosowaniu metody opartej na przewodniku GUM.

Słowa kluczowe: pomiar temperatury, niepewność pomiaru, CPET.

1. WSTĘP

Próbę wysiłkową przeprowadza się w celu uzyskania dokładnej oceny wydolności fizycznej u sportowców, ale także u pacjentów z chorobami kardiologicznymi czy pulmonologicznymi. Najczęściej przeprowadza się wysiłkowe badanie sercowo-płucne – CPET (ang. cardiopulmonary exercise test), spiroergometria [1, 2, 3].

Badanie diagnostyczne CPET jest nieinwazyjne, wiarygodne oraz bezpieczne i polega na analizie gazów wydechowych podczas narastającego wysiłku (w układzie z oddechu na oddech). Podczas wykonywania badań rejestrowane są dane dotyczące m.in.: zmian w stężeniach wydychanych gazów: tlenu (pO_2) i dwutlenku węgla (pCO_2), wentylacji minutowej płuc, saturacji krwi tlenem (SpO_2), częstości skurczów serca (HR) i ciśnienia tętniczego krwi (BP), oraz wielkości wykonywanej przez osobę badaną pracy zewnętrznej w jednostce czasu – mocy (WR) a także o subiektywnej ocenie wysiłku (wg. skali Borga) [4].

Wynik przeprowadzonego badania pozwala ocenić zmiany wydolności fizycznej i parametrów metabolicznych zachodzących w danym organizmie podczas próby i umożliwia zaprogramowanie intensywności treningu fizycznego w czasie treningu sportowego.

Autorzy – do podstawowych parametrów mierzonych podczas CPET – zdecydowali się dodać pomiar temperatury w określonych punktach ciała człowieka.

Ze względu na fakt, iż podczas wysiłku fizycznego występuje zjawisko znacznego wzrostu ilości wysokoenergetycznych procesów metabolicznych, temperatura ciała człowieka może wzrosnąć znacznie powyżej temperatury spoczynkowej. Wzrost temperatury ciała jest jednym z sygnałów odbieranych przez mózg jako oznaka zmęczenia [5, 6, 7].

2. METODA POMIARU

Do badań dynamiki zmian temperatury skóry człowieka, w wybranych punktach, zdecydowano się wykorzystać metodę kontaktową tak, aby zapewnić wymaganą dokładność pomiarów. Jako czujnik wykorzystano termoelement w płaszczu teflonowym ze względu na fakt, iż element ten jest odporny na niekorzystny wpływ agresywnego chemicznie środowiska pracy. Rozwiązanie takie pozwala na ograniczenie wpływu między innymi występowania potu na skórze człowieka na wynik, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiedniej dynamiki pomiaru termoelementem umieszczonym w płaszczu teflonowym

Na podstawie przeprowadzonej analizy uzyskanych wstępnych wyników określono wymagania jakie powinien spełniać system pomiarowy. Parametry tego układu to: rozdzielczość pomiaru co najmniej 0,01 °C, częstotliwość próbkowania o wartości co najmniej 4 Hz, pomiar w dwóch punktach ciała jednocześnie.

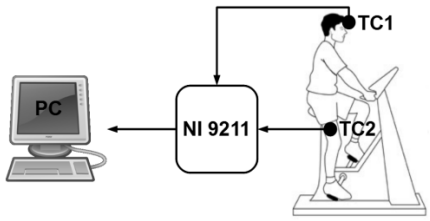
Przewidywany zakres zmian temperatury skóry człowieka wynosi od 32 °C do 41 °C, dlatego zdecydowano, że rolę czujników będą pełniły termoelementy typu T klasy 1 dostarczone przez firmę Termoaparatura Wrocław.

W celu akwizycji sygnałów pomiarowych wykorzystano 24-bitowy moduł NI 9211, który umożliwia jednoczesny pomiar z dwóch czujników z częstotliwością maksymalnie 7 Hz.

Schemat wykonanego stanowiska badawczego został przedstawiony na rysunku 1 [3].

Głównym komponentem zbudowanego układu jest zaprojektowana specjalistyczna aplikacja, która umożliwia pomiar, rejestrację, wizualizację oraz archiwizację danych.

Próbę wysiłkową przeprowadzono na kilkunastu osobach - nastolatkach. W artykule zaprezentowane zostaną jedynie przykładowe wyniki dwóch wybranych osób.



Rys. 1. Schemat systemu do pomiaru temperatury podczas próby wysiłkowej: TC1, TC2 – termoelementy typu T [3]

3. NIEPEWNOŚĆ POMIARU TEMPERATURY SKÓRY CZŁOWIEKA PODCZAS TESTU WYSIŁKOWEGO

Analiza metrologiczna systemu do pomiaru temperatury podczas próby wysiłkowej miała na celu oszacowanie niepewności pomiarów dokonywanych zaproponowanym układem. Wyniki tych analiz pozwolą sprecyzować, jakiej niepewności pomiarowej można się spodziewać, dokonując badań dynamiki zmian temperatury skóry człowieka w określonych warunkach, na zaproponowanym stanowisku badawczym.

Szacowanie niepewności wykorzystanego układu do pomiaru dynamiki zmian temperatury przeprowadzono w oparciu o wytyczne przedstawione w Przewodniku GUM [8, 9]. Analiza została wykonana dla pojedynczego toru pomiarowego.

Funkcja błędu pomiaru temperatury e(T) przedstawia się następująco:

$$e(T) = \Delta T_s + \Delta T_c + \Delta T_{DAQ} \tag{1}$$

gdzie:

ΔT_s - błąd losowy pomiaru temperatury,

ΔT_c - błąd graniczny czujnika temperatury typu T, podany przez producenta,

ΔT_{DAQ} - błąd graniczny karty akwizycji sygnałów pomiarowych, zawarty w specyfikacji urządzenia.

Niepewność pomiaru temperatury, przy założeniu braku korelacji między niepewnościami wielkości mierzonych, określa wzór [8, 9, 10]:

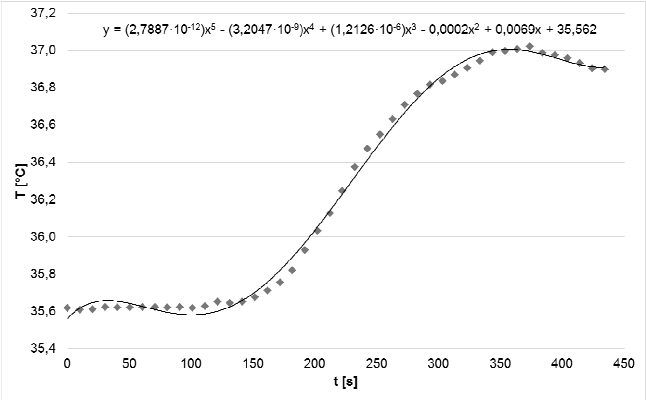
$$u(T) = \sqrt{u^2(\Delta T_s) + u^2(\Delta T_c) + u^2(\Delta T_{DAQ})}\,. \tag{2}$$

Zatem w celu określenia niepewności pomiaru temperatury $u(T)$ należy uwzględnić wariancję wynikającą z błędu losowego $u^2(\Delta T_s)$, błędu granicznego zastosowanego czujnika pomiarowego $u^2(\Delta T_c)$ oraz wariancję wynikającą z błędu granicznego układu akwizycji danych $u^2(\Delta T_{DAQ})$.

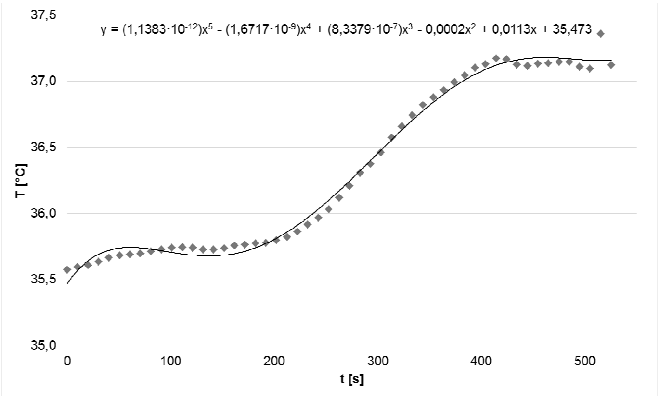
Wartość $u^2(\Delta T_s)$ wyznaczono jako wariancję typu A, natomiast obie pozostałe wartości wyznaczono jako wariancję typu B, na podstawie danych podanych przez producenta w specyfikacji czujnika oraz karty akwizycji.

3.1. Niepewność typu A

Uzyskane wyniki pomiaru temperatury potwierdziły, że funkcja $T(t)$ opisująca zmianę temperatury skóry człowieka podczas próby wysiłkowej jest funkcją silnie nieliniową (rys. 2 i rys. 3).



Rys. 2. Wyniki pomiaru temperatury T skóry uczestnika nr 1 podczas próby wysiłkowej w funkcji czasu t trwania badania



Rys. 3. Wyniki pomiaru temperatury T skóry uczestnika nr 2 podczas próby wysiłkowej w funkcji czasu t trwania badania

Niestety, przewodnik GUM nie podaje ścisłych wytycznych odnośnie szacowania niepewności pomiarów dynamicznych. Szczególnie problematyczne jest wyznaczanie niepewności typu A.

W referacie autorzy proponują wyznaczyć niepewność typu A jako odchylenie wyników pomiarów od wielomianu aproksymującego (wyższego rzędu) [11]. W tym celu najpierw metodą najmniejszych kwadratów dopasowano krzywą do punktów pomiarowych. Współczynniki wielomianu aproksymacyjnego a obliczono ręcznie, w programie Excel, wykorzystując jakobiany macierzy. Najlepsze rezultaty uzyskano dla wielomianów piątego stopnia (współczynnik korelacji na poziomie R = 0,996). Wyznaczone wielomiany aproksymacyjne wyników pomiarów dla uczestników nr 1 i 2 znajdują się odpowiednio na rysunku 2 i rysunku 3.

Następnie oszacowano niepewność typu A jako odchylenie wyników pomiarów od obliczonego wielomianu aproksymacyjnego zgodnie z zależnością [12]:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(y_i - \sum_{l=0}^{m} a_l x_i^l\right)^2}{n-m-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\varepsilon_i^2}{m-n-1}} \tag{3}$$

gdzie:

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

s – średnie odchylenie standardowe krzywej aproksymującej od wyników pomiaru,
y_i – wartości prawdziwe wyników pomiaru,
a – współczynniki wielomianu aproksymacyjnego,
n – liczba punktów aproksymowanych,
m – stopień wielomianu aproksymacyjnego,
ε_i – różnica pomiędzy wartościami prawdziwymi y_i a wartościami wielomianu aproksymującego ax_i.

Do dalszych rozważań przyjęto, iż średnie odchylenie standardowe s podniesione do kwadratu jest równe wariancji typu A pomiaru temperatury skóry człowieka:

$$s^2 = u^2(\Delta T_s) \tag{4}$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano następujące wartości niepewności typu A odpowiednio dla pierwszego (rys. 2) i drugiego (rys. 3) badania:
$u_1(\Delta T_s) = 0{,}04$ °C, $u_2(\Delta T_s) = 0{,}05$ °C.

3.2. Niepewność typu B

Wariancję $u^2(\Delta T_c)$ wyznaczono przyjmując normalny rozkład prawdopodobieństwa błędu ΔT_c [11], zgodnie z poniższą zależnością:

$$u^2(\Delta T_c) = \left(\frac{\Delta T_c}{2}\right)^2 . \tag{5}$$

Wartość błędu granicznego δT_c przyjęto z normy PN-EN 60584-2 [13], w której tolerancja wykonania termoelementu typu T klasy 1 wynosi:

$$\Delta T_c = \pm\ 0{,}5\ °\mathrm{C}\ . \tag{6}$$

Natomiast wariancję $u^2(\Delta T_{DAQ})$ obliczono, przyjmując prostokątny rozkład prawdopodobieństwa błędu ΔT_{DAQ}, zgodnie z poniższym wzorem:

$$u^2(\Delta T_{DAQ}) = \left(\frac{\Delta T_{DAQ}}{\sqrt{3}}\right)^2 . \tag{7}$$

Z danych zawartych w karcie katalogowej modułu akwizycji NI 9211 [14] wynika, iż w przypadku pomiaru za pomocą termoelementu typu T, błąd graniczny jest równy:

$$\Delta T_{DAQ} = \pm\, 0{,}05\ °\mathrm{C}\ . \tag{8}$$

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, iż oszacowana niepewność typu B dla rozpatrywanego układu pomiarowego wynosi 0,25 °C.

3.3. Niepewność rozszerzona

Niepewność standardowa pomiaru temperatury $u(T)$ została wyznaczona zgodnie z zależnością (2) i dla powyższych danych wynosi (dla obu przypadków):

$$u(T) = 0{,}25\ °\mathrm{C}\ . \tag{9}$$

Niepewność rozszerzona pomiaru temperatury $U(T)$, dla współczynnika rozszerzenia $k = 2$ (co odpowiada w przybliżeniu prawdopodobieństwu rozszerzenia 95%) [11], wynosi:

$$U(T) = 2u(T) = 0{,}50\ °\mathrm{C}\ . \tag{10}$$

Budżet niepewności estymaty temperatury 36,26 ºC (wyznaczony na postawie wyników uzyskanych podczas próby wysiłkowej uczestnika nr 1) podano w Tabeli 1.

Tabela 1. Budżet niepewności estymaty temperatury 36,26 °C

Wielkość X_n	Estymata wielkości x_n	Wariancja standardowa $u^2(x_n)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_n	Udział w wariancji złożonej $u^2_n(y)$
$\bar{T}$	36,26 ºC	0,18E-3 ºC^2	normalny	1,00 ºC/ºC	0,18E-3 ºC^2
T_s	0,00 ºC	1,60E-3 ºC^2	normalny	1,00 ºC/ºC	1,60E-3 ºC^2
T_c	0,00 ºC	0,06 ºC^2	normalny	1,00 ºC/ºC	0,06 ºC^2
T_{DAQi}	0,00 ºC	0,83E-3 ºC^2	prostokątny	1,00 ºC/ºC	0,83E-3 ºC^2
			Niepewność standardowa $u(i)$		0,25 ºC
			Niepewność rozszerzona $U(i)$		0,50 ºC

W tabeli 2 zaprezentowano budżet niepewności estymaty temperatury dla 36,33 °C (wyznaczony na postawie wyników uzyskanych podczas próby wysiłkowej uczestnika nr 2).

Tabela 2. Budżet niepewności estymaty temperatury 36,33 °C

Wielkość X_n	Estymata wielkości x_n	Wariancja standardowa $u^2(x_n)$	Rozkład prawdopodobieństwa	Współczynnik wrażliwości c_n	Udział w wariancji złożonej $u^2_n(y)$
$\bar{T}$	36,33 ºC	0,18E-3 ºC^2	normalny	1,00 ºC/ºC	0,18E-3 ºC^2
T_s	0,00 ºC	2,50E-3 ºC^2	normalny	1,00 ºC/ºC	2,50E-3 ºC^2
T_c	0,00 ºC	0,06 ºC^2	normalny	1,00 ºC/ºC	0,06 ºC^2
T_{DAQi}	0,00 ºC	0,83E-3 ºC^2	prostokątny	1,00 ºC/ºC	0,83E-3 ºC^2
			Niepewność standardowa $u(i)$		0,25 ºC
			Niepewność rozszerzona $U(i)$		0,50 ºC

Zgodnie z powyższymi szacunkami niepewności, wyniki pomiaru temperatury obu uczestników próby wysiłkowej można zapisać jako:
- uczestnik nr 1: $T = (36{,}26 \pm 0{,}50)$ °C,
- uczestnik nr 2: $T = (36{,}33 \pm 0{,}50)$ °C.

4. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zagadnienie dotyczące szacowania niepewności pomiaru temperatury w wybranych punktach ciała człowieka podczas próby wysiłkowej metodą opartą na Przewodniku GUM z zastosowaniem prawa propagacji niepewności. W celu określenia niepewności pomiaru temperatury autorzy przedstawili metodologię postępowania, w której uwzględniono zarówno niepewność typu A, wynikającą z błędu losowego oraz niepewność typu B zależną od błędu granicznego zastosowanego czujnika pomiarowego oraz od błędu granicznego układu akwizycji danych.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl

Wyniki uzyskanych analiz pozwalają określić, jakiej niepewności można się spodziewać dokonując pomiarów temperatury zaprojektowanym systemem.

Na podstawie otrzymanych wyników dla czujników temperatury można stwierdzić, iż niepewność typu A jest o jeden rząd mniejsza niż niepewność typu B.

Dla rozpatrywanych w artykule przypadków pomiaru temperatury, których estymaty wynoszą odpowiednio $T = 36{,}26$ °C oraz $T = 36{,}33$ °C, uzyskano oszacowaną niepewność o wartości 0,50 °C.

Należy pamiętać, iż wyznaczanie wielomianów aproksymujących dla każdego z badanych przypadków należy wykonywać niezależnie, gdyż dynamika zamian temperatury podczas próby wysiłkowej jest ściśle powiązana z indywidualnymi cechami fizjologicznymi badanych osób.

Zdaniem autorów, obliczona na podstawie opracowanej metodologii wartość niepewności funkcji przetwarzania dla czujników temperatury, potwierdza zasadność ich stosowania do celów pomiaru dynamicznych zmian temperatury skóry podczas testu wysiłkowego.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Dzwonkowski A., Golijanek-Jędrzejczyk A., Rafiński L.: Szacowanie niepewności pomiaru temperatury skóry metodą Monte Carlo, Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 34 (2013), s.21-24.
2. Barker A.R, Williams C.A, Jones A.M, Armstrong N.: Establishing maximal oxygen uptake in young people during a ramp cycle test to exhaustion, Br J Sports Med., 45(6), 2011, p. 498-503.
3. Rafiński L., Łuszczyk M.: A measurement system for children endurance tests, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering. Computer Applications in Electrical Engineering, iss. 72, 2012, p. 57-64, ISSN 1897-0737.
4. Bongers B.C., Hulzebos E.H.J., Van Brussel M., Takken T.: Pediatric Norms for cardiopulmonary Exercise Testing, Uitgeverij BOXPress, s'-Hertogenbosch, 2:3, 2012, p. 30-34.
5. Falk B.: Effects of thermal stress during rest and exercise in the paediatric population, Sports Medicine, 25 (4), 1998, p. 221-40.
6. Chin Leong Lim, Chris Byrne, Jason K.W. Lee: Human Thermoregulation and Measurement of Body Temperature in Exercise and Clinical Settings, Annals, Academy of Medicine, Singapore 2008.
7. Inbar O., Morris N., Epstein Y., Gass G.: Comparison of thermoregulatory responses to exercise in dry heat among prepubertal boys, young adults and older males, Experimental Physiology, 89 (6), 2004, p. 691-700.
8. Evaluation of measurement data — An introduction to the Guide to the expression of uncertainty in measurement and related documents, JCGM 104:2009.
9. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement - JCGM 100:2008, GUM 1995 with minor corrections, First edition, September 2008.
10. Piotrowski J., Kostyrko K.: Wzorcowanie aparatury pomiarowej. Wydanie II zmienione i uaktualnione, PWN, Warszawa 2012.
11. Taylor J. R. Wstęp do analizy błędu pomiarowego, WN PWN, Warszawa 1995.
12. Tomašević N., Tomašević M., Stanivuk T.: Regression analysis and approximation by means of Chebyshev polynomial, Informatologia 42, 2009., 3, 166-172.
13. PN-EN 60584-2: Termoelementy – Tolerancje, 1997.
14. NI 9211, Datasheet, ni.com, 20.12.2012.

ESTIMATION OF UNCERTAINTY OF MEASUREMENT OF HUMAN SKIN TEMPERATURE DURING THE EXERCISE STRESS TEST

The team made up of the authors, has developed a new, non-invasive method of measuring the temperature of the human body selected points during the exercise test. For the purposes of the measurement a thermoelectric sensor has been used, which provided the required accuracy of the skin temperature dynamics changes during the exercise test.

The paper presents a methodology for estimating the combined uncertainty in measuring the temperature of human skin, using a method based on the GUM guide.

The results obtained from analysis can help determine which measurement uncertainty can be expected making temperature measurements using the designed system.

On the basis of the results for temperature sensors it can be concluded that the uncertainty of type A is about one order smaller than the uncertainty Type B. For cases considered in the article temperature measurement, which estimates amount to $T = 36.26$ °C and $T = 36.33$ °C, that the estimated uncertainty of 0.50 °C.

It should be noted that the determination of approximating polynomials for each of the cases must be performed separately, because the dynamics of change of the temperature during exercise testing is closely connected with individual physiological features of each person.

Keywords: temperature measurement, measurement uncertainty, CPET.

MOST WIEDZY Pobrano z mostwiedzy.pl