

# Monitor haptyczny zbudowany w oparciu o system dysz powietrznych z zaworami termobimetalicznymi

PAWEŁ LIGĘZA 

*Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków*

## Streszczenie

Systemy haptyczne to urządzenia pobudzające zmysł dotyku. Oddziałują one na receptory somatosensoryczne skóry organizmów żywych. Monitory haptyczne stanowią układy wyjściowe urządzeń technicznych, umożliwiające przekazanie informacji i komunikację z odbiorcą, w szczególności z człowiekiem. W monitorach haptycznych istotna jest możliwość przekazania odpowiednio dużej ilości informacji w sposób precyzyjny i jednoznaczny. Bodźce powinny być dobrze wyczuwalne, z możliwością lokalizacji położenia bodźca i jego amplitudy. Monitory haptyczne w zależności od przeznaczenia i wymaganych właściwości oraz parametrów wykorzystują różnorodne źródła bodźca dotykowego. W artykule przedstawiono koncepcję nowatorskiego monitora haptycznego przekazującego informację za pomocą sterowanych strumieni powietrza.

**Słowa kluczowe:** haptyka, zmysł dotyku, transfer informacji maszyna – człowiek, monitor haptyczny, dysze powietrzne, zawory termobimetaliczne

## 1. Wprowadzenie

Systemy haptyczne to urządzenia pobudzające zmysł dotyku [1-5]. Oddziałują one poprzez generowanie bodźców na receptory somatosensoryczne [6,7] skóry organizmów żywych. Receptory te stanowią zakończenia nerwów czuciowych, umożliwiających przesyłanie odebranych bodźców za pomocą impulsów do ośrodkowego układu nerwowego. Monitory haptyczne stanowią układy wyjściowe urządzeń technicznych, umożliwiające przekazanie informacji i komunikację z organizmem żywym, w szczególności z człowiekiem, z wykorzystaniem zmysłu dotyku [8-10]. Monitory haptyczne mogą pobudzać zmysł dotyku za pomocą oddziaływań mechanicznych, termicznych i elektrycznych. Wykorzystuje się tu nacisk, wibracje, ruch, zmianę temperatury, przepływ prądu oraz inne bodźce odbierane przez zmysł dotyku. Monitory haptyczne mogą przekazywać informację binarną, tekstową, obrazową lub reprezentowaną w innej formie. Informacja przekazywana jest najczęściej na skórę palców, dłoni lub twarzy odbiorcy. Są to rejony ciała o gęstym rozmieszczeniu receptorów [11].

Powszechnie stosowane są monitory haptyczne przekazujące informację w postaci wypukłych elementów punktowych na płaszczyźnie. Elementy punktowe mogą być nieruchome, do przekazania informacji stałej w czasie. Do przekazywania informacji dynamicznie zmiennej z płaszczyzny mogą podnosić się lub obniżać sztyfty przemieszczane systemem siłowników elektromagnetycznych. Monitory takie używane są do komunikacji z osobami niewidomymi za pomocą alfabetu Braille'a [12-14], lub przekazywania informacji obrazowej, na przykład w muzeach, galeriach sztuki, zabytkach, obiektach turystycznych oraz innych obiektach publicznych [15-16]. Elementy punktowe w matrycy mogą być wyróżniane poprzez bodźce termiczne. Ciekawym rozwiązaniem jest tu matryca dotykowa dla osób niewidomych, przekazująca informację za pomocą odczuć termicznych z wykorzystaniem modułów Peltier'a [17].

Innym rozwiązaniem są monitory haptyczne przekazujące informację za pomocą wibracji mechanicznych [18-20]. Przykładem takiego monitora jest układ wibracji w telefonie komórkowym, który sygnalizuje użytkownikowi wystąpienie określonego zdarzenia. Znane są także monitory haptyczne, w których wykorzystywane są ultradźwięki. Przykładem jest zastosowanie głośników ultradźwiękowych

do generowania uczucia dotyku twarzy w technologii Virtual Reality [21,22]. Powszechnie jest stosowane urządzeń haptycznych w lotnictwie w technologii fly-by-wire. Dzięki wykorzystaniu systemu siłowników lub innych aktuatorów pilot ma możliwość odczuwania sił reakcji elementów sterowania, pomimo braku fizycznego połączenia [23-25].

W monitorach haptycznych ważne jest, aby układ miał możliwość przekazania odpowiednio dużej ilości informacji w sposób precyzyjny i jednoznaczny. Boddźce powinny być dobrze wyczuwalne, z możliwością lokalizacji położenia bodźca i jego amplitudy. Często istotne jest przekazanie informacji w sposób możliwie bezgłośny. Monitory haptyczne są ciągle doskonalone i rozwijane, oraz wprowadzane są nowe technologie i rozwiązania techniczne, rozszerzające zakres stosowania na różnorodne dziedziny, takie jak medycyna, robotyka czy nawet gry komputerowe [26-29]. W artykule przedstawiono koncepcję nowatorskiego monitora haptycznego przekazującego informację za pomocą sterowanych strumieni powietrza. Jedną z głównych zalet proponowanego rozwiązania jest brak konieczności fizycznego dotyku monitora, co na przykład w kontekście pandemii COVID-19 staje się istotną cechą wyróżniającą proponowane rozwiązanie [30].

## **2. Koncepcja monitora haptycznego z wykorzystaniem strumieni powietrza**

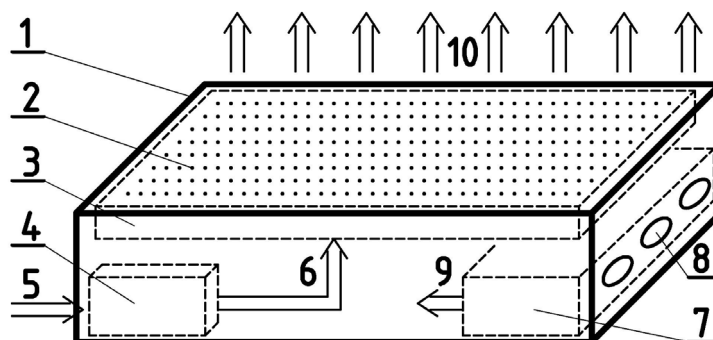
Przedstawiony w artykule monitor haptyczny stanowi system do przekazywania informacji o charakterze binarnym, tekstowym lub obrazowym z urządzenia technicznego, na przykład komputera, do odbiorcy będącego organizmem żywym, na przykład człowieka. W proponowanym urządzeniu informacja przekazywana jest do receptorów somatosensorycznych znajdujących się na powierzchni skóry, dłoniach, twarzy lub innej części ciała. Wykorzystywanym bodźcem jest zespół strumieni powietrza wytwarzanych poprzez system dysz ze sterowanymi zaworami. Monitor haptyczny stanowiący przedmiot badań zbudowane jest z obudowy, w której wytwarzane jest ciśnienie powietrza za pomocą kompresora. W obudowie, na jej górnej części rozmieszczony jest system dysz wytwarzających strumienie powietrza skierowane na ciało odbiorcy. Strumień powietrza z poszczególnych dysz regulowany jest przez zawory termobimetaliczne, sterowane z urządzenia przekazującego informację do odbiorcy. Urządzenie to stanowi system przetwarzania informacji oparty o komputer oraz zespół wykonawczy sterowania zaworów. W ten sposób rozdzielone przestrzennie strumienie powietrza stanowią bodźce, które oddziałują na receptory czuciowe odbiorcy w różnych miejscach z siłą zależną od stopnia otwarcia zaworów termobimetalicznych.

Rozwiązanie takie pozwala na wytworzenie na skórze odbiorcy rozłożonego przestrzennie wrażenia czuciowego o zróżnicowanej sile, umożliwiającego przekazywanie zmiennej w czasie informacji o charakterze binarnym, tekstowym w systemie Braille'a lub informacji obrazowej. Monitor haptyczny działający na takiej zasadzie umożliwia uzyskanie znacznej rozdzielczości przestrzennej oraz zmienności amplitudy przekazywanego odczucia. Dodatkowym bodźcem może być zróżnicowanie temperatury poszczególnych strumieni poprzez zastosowanie sterowanych elementów grzejnych. Optymalizacja parametrów pracy takiego monitora wymaga szeregu badań związanych z zależnością siły i jakości odczuć sensorycznych osoby korzystającej z monitora od szeregu parametrów technicznych. Można tu wymienić ilość i rozmieszczenie dysz, parametry strumienia związane z zakresem prędkości i kształtu, temperaturą, powierzchnią i kształtem matrycy oraz inne parametry.

## **3. Budowa monitora haptycznego z zaworami termobimetalicznymi**

Na rysunku 1. przedstawiono schematycznie proponowany, koncepcyjny monitor haptyczny wykorzystujący strumienie powietrza do przekazu sensorycznego.

Monitor posiada prostopadłościenną obudowę 1 wykonaną z tworzywa ABS. W górnej części obudowy monitora haptycznego umieszczona jest płaska płyta prostokątna wykonana z poliwęglanu z rozmieszczonymi regularnie w formie matrycy prostokątnej otworami 2. Pełnią one rolę dysz wylotowych powietrza, kształtujących strumienie stanowiące bodźce sensoryczne skierowane do odbiorcy informacji. Otwory posiadają przewężenia o średnicy około 0,5 mm. Otwory 2 stanowiące dysze rozmieszczone są w układzie siatki prostokątnej o ilości  $36 \times 8$  otworów, natomiast odległość kolejnych otworów wynosi w proponowanym rozwiązaniu około 10 mm. Przepływ powietrza przez każdą z dysz 2 regulowany jest za pomocą oddzielnego zaworu termobimetalicznego. Zespół zaworów 3 przymocowany jest do płaskiej



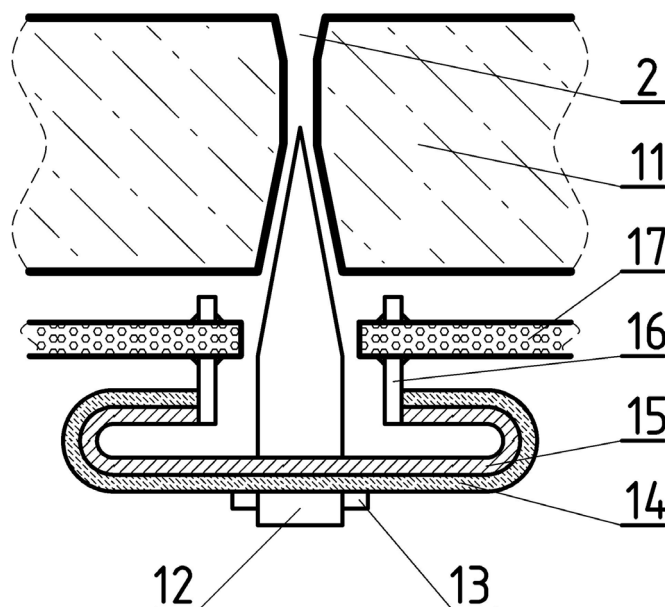
**Rys. 1.** Schematyczna budowa monitora haptycznego z zaznaczeniem istotnych elementów; Elementy monitora haptycznego:

- 1 – obudowa, 2 – dysze rozmieszczone w układzie matrycy, 3 – zespół zaworów, 4 – układ sterowania zaworów,  
5 – sygnał z urządzenia wejściowego (komputera), 6 – sygnały sterowania zaworami, 7 – kompresor,  
8 – otwory zasysania powietrza, 9 – nadciśnienie wewnętrzne monitora

plyty z otworami 2 od spodu. Zespół zaworów sterowany jest z elektronicznego układu sterowania 4, który na podstawie informacji z urządzenia wejściowego 5, stanowiącego komputer, wytwarza napięciowe impulsy sterujące 6 poszczególnymi zaworami.

Układ sterowania 4 stanowi system mikroprocesorowy, który przetwarza przeznaczoną do obrazowania na monitorze informację z urządzenia wejściowego 5, na sygnały sterujące dla każdego z zaworów termobimetalicznych. Informacja z urządzenia wejściowego 5 dostarczana jest w postaci ośmiobitowej wartości amplitudy otwarcia zaworu kolejno dla wszystkich dysz otworowych 2. Układ sterowania 4 zamienia tę informację dla każdego zaworu na prostokątny sygnał napięciowy o maksymalnej amplitudzie 5 V i współczynnika wypełnienia wprost proporcjonalnym do ośmiobitowego słowa sterującego. W ten sposób dla wartości sterującej 0 zawór jest całkowicie zamknięty, a dla wartości 255 całkowicie otwarty. W obudowie 1 znajduje się także kompresor 7, który pobiera powietrze z zewnątrz poprzez otwory 8 w obudowie 1, i wytwarza wewnątrz tej obudowy stałe nadciśnienie 9 o wartości około 50 kPa. Obudowa poza otworami wlotowymi 8 i dyszami wylotowymi 2 jest szczelna. W ten sposób regulowane strumienie powietrza ze wszystkich otworów 2 tworzą bodźce, odbierane jako wrażenie czuciowe na dłoniach odbiorcy umieszczonych ponad monitorem haptycznym, przy czym wrażenie to odpowiada informacji z urządzenia wejściowego 5.

Szczegóły budowy pojedynczego zaworu termobimetalicznego dla dysz 2 przedstawiono na rysunku 2.



**Rys. 2.** Schematyczna budowa zaworu termobimetalicznego z zaznaczeniem istotnych elementów; Elementy zaworu termobimetalicznego: 2 – dysza powietrzna, 11 – płyta matrycy dysz, 12 – iglice regulacyjne, 13 – łożyska gwintowane iglic, 14 – warstwa czynna termobimetalu, 15 – warstwa bierna termobimetalu, 16 – wsporniki i doprowadzenia elektryczne termobimetalu, 17 – płyta mocowania i doprowadzenia sygnałów sterujących zaworów

Otwory dysz 2 o odpowiednio dobranym kształcie z przewężeniem konfuzyjnym wykonane są w płaskiej płycie 11 z poliwęglanu. Strumień powietrza wypływającego przez dysze 2 regulowany jest przez stalowe iglice 12,. Iglice te nagwintowane w dolnej części i wkręcone w łoża gwintowane 13, przymocowane do termobimetali 14 i 15. Łoża gwintowane 13 umożliwiają poprzez obrót iglic 12 ustawienie ich pozycji początkowej całkowicie zamykającej dysze 2. Termobimetal wykonany jest w kształcie litery C o szerokości 8 mm ze zgrzanych ze sobą dwóch warstw metalicznych. Warstwy te to warstwa czynna 14 ze stali wysokoniklowej oraz warstwa bierna 15 z inwaru. Napięcie sterujące 6 do termobimetalu 14 i 15 doprowadzane jest przez stalowe wsporniki 16 stanowiące również mechaniczne mocowanie termobimetalu w płycie 17, wykonanej z miedziowanego laminatu szklano-epoksydowego techniką obwodów drukowanych. Ścieżki przewodzące płyty 17 doprowadzają napięcia sterujące 6 z układu sterowania 4 do wszystkich zaworów termobimetalicznych. Pod wpływem przepływu prądu przez termobimetal zmienia on swoją temperaturę i kształt, a iglica 12 przemieszcza się. W ten sposób przepływ powietrza przez dysze 2 zmienia się. Bezwładność termiczna termobimetalu umożliwia sterowanie zaworów za pomocą zmiany współczynnika wypełnienia sygnału napięciowego.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawiona koncepcja rozwojowa monitora haptyczny stanowi nowatorski system do przekazywania informacji o charakterze binarnym, tekstowym i obrazowym z urządzenia technicznego do odbiorcy będącego organizmem żywym, najczęściej człowieka. Informacja przekazywana jest w formie bodźców czuciowych wywołanych strumieniami powietrza o zróżnicowanej intensywności. Odbierana jest poprzez receptory somatosensoryczne znajdujące się na powierzchni skóry. Opracowywany monitor koncepcyjny zbudowany jest z obudowy, w której wytwarzane jest nadciśnienie powietrza za pomocą kompresora, a jego nowatorską cechą jest to, że w obudowie znajduje się system dysz wylotowych z zaworami termobimetalicznymi zbudowanymi z iglic połączonych z termobimetalami. Termobimetały pod wpływem przepływu prądu zmieniają swoją temperaturę i kształt, przesuwając iglice w dyszach i regulując natężenie strumieni powietrza z dysz na skórę odbiorcy.

Termobimetaliczne zawory monitora haptycznego stanowiącego przedmiot opracowania sterowane są poprzez doprowadzenia elektryczne prostokątnym sygnałem napięciowym o stałej amplitudzie i współczynnika wypełnienia wprost proporcjonalnym do wartości sygnału sterującego z urządzenia wejściowego i komputera. Sygnał ten określa amplitudę bodźca haptycznego dla każdej z dysz, generując w ten sposób informację dla odbiorcy. Dodatkowo w proponowanym rozwiązaniu przewidziano regulację ustawienia początkowego zaworów. Iglice zaworów są nagwintowane w dolnej części i wkręcone w łoża gwintowane, przymocowane do termobimetalu, co umożliwia poprzez obrót iglicy ustawienie jej pozycji początkowej całkowicie zamykającej dysze.

Prezentowany monitor haptyczny stanowi koncepcyjne rozwiązanie pilotażowe, będące przedmiotem zgłoszenia patentowego [31]. Szereg elementów wymaga dalszego opracowania i optymalizacji. Dotyczy to zarówno strony mechanicznej jak i elektronicznej i informatycznej. W szczególności badań i optymalizacji wymaga kształtowanie strug powietrza z dysz [32-35], stanowiących źródła bodźców somatosensorycznych monitora. Może to stanowić przedmiot dalszych badań i rozwoju zaprezentowanej koncepcji. Wydaje się jednak, że dzięki swoim nowatorskim cechom monitor ten może znaleźć zastosowanie w wybranych obszarach przekazu informacji z wykorzystaniem zmysłu dotyku. Dotyczy to takich dziedzin jak komunikacja, techniki starowania, medycyna czy rozrywka.

Praca została wykonana w roku 2022 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

#### Literatura

- [1] Jenkins, B.A., & Lumpkin, E.A. (2017). *Developing a sense of touch*. Development, **144** (22), 4078-4090.
- [2] Lederman, S.J., & Klatzky, R.L. (2009). *Haptic perception: A tutorial*. Attention, Perception, & Psychophysics, **71** (7), 1439-1459.
- [3] Steinbach, E., Hirche, S., Ernst, M., Brandi, F., Chaudhari, R., Kammerl, J., & Victorias, I. (2012). *Haptic communications*. Proceedings of the IEEE, **100** (4), 937-956.

- [4] Adams, R.J., & Hannaford, B. (1999). *Stable haptic interaction with virtual environments*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, **15** (3), 465-474.
- [5] Sreelakshmi, M., & Subash, T.D. (2017). *Haptic technology: A comprehensive review on its applications and future prospects*. Materials Today: Proceedings, **4** (2), 4182-4187.
- [6] Pleger, B., & Villringer, A. (2013). *The human somatosensory system: from perception to decision making*. Progress in neurobiology, **103**, 76-97.
- [7] Hendry, S., & Hsiao, S. (2013). *The somatosensory system*. In Fundamental Neuroscience: Fourth Edition (pp. 531-551). Elsevier Inc.
- [8] Wang, H., & Kosuge, K. (2012). *Control of a robot dancer for enhancing haptic human-robot interaction in waltz*. IEEE transactions on haptics, **5** (3), 264-273.
- [9] Sreelakshmi, M., & Subash, T.D. (2017). *Haptic technology: A comprehensive review on its applications and future prospects*. Materials Today: Proceedings, **4** (2), 4182-4187.
- [10] Steinbach, E., Hirche, S., Ernst, M., Brandi, F., Chaudhari, R., Kammerl, J., & Victorias, I. (2012). *Haptic communications*. Proceedings of the IEEE, **100** (4), 937-956.
- [11] Akahane, K., Yu, C., Liu, X., & Sato, M. *The research of light-weighted finger haptic device using voice coil*.
- [12] Seim, C., Chandler, J., DesPortes, K., Dhingra, S., Park, M., & Starner, T. (2014, September). *Passive haptic learning of Braille typing*. In Proceedings of the 2014 ACM International Symposium on Wearable Computers (pp. 111-118).
- [13] Paneva, V., Seinfeld, S., Kraiczi, M., & Müller, J. (2020, July). *HaptiRead: Reading Braille as mid-air haptic information*. In Proceedings of the 2020 ACM Designing Interactive Systems Conference (pp. 13-20).
- [14] Bettelani, G.C., Averta, G., Catalano, M.G., Leporini, B., & Bianchi, M. (2020). *Design and validation of the readable device: a single-cell electromagnetic refreshable braille display*. IEEE transactions on haptics, **13** (1), 239-245.
- [15] Brewster, S. (2017). *The impact of haptic 'touching' technology on cultural applications*. In Digital applications for cultural and heritage institutions (pp. 301-312). Routledge.
- [16] Dima, M., Hurcombe, L., & Wright, M. (2014, June). *Touching the past: haptic augmented reality for museum artefacts*. In International Conference on Virtual, Augmented and Mixed Reality (pp. 3-14). Springer, Cham.
- [17] Kos, A. *Matryca dotykowa dla osób niewidomych*, (2010) Patent PL 20 6784 B1, UPRP.
- [18] Visell, Y., Giordano, B. L., Millet, G., & Cooperstock, J.R. (2011). *Vibration influences haptic perception of surface compliance during walking*. PLoS one, **6** (3), e17697.
- [19] Hwang, J., & Hwang, W. (2011). *Vibration perception and excitatory direction for haptic devices*. Journal of Intelligent Manufacturing, **22** (1), 17-27.
- [20] Jayant, C., Acuario, C., Johnson, W., Hollier, J., & Ladner, R. (2010, October). *V-braille: haptic braille perception using a touch-screen and vibration on mobile phones*. In Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility (pp. 295-296).
- [21] Dangxiao, W., Yuan, G.U.O., Shiyi, L.I.U., Zhang, Y., Weiliang, X., & Jing, X. (2019). *Haptic display for virtual reality: progress and challenges*. Virtual Reality & Intelligent Hardware, **1** (2), 136-162.
- [22] Wu, C.M., Hsu, C.W., Lee, T.K., & Smith, S. (2017). *A virtual reality keyboard with realistic haptic feedback in a fully immersive virtual environment*. Virtual Reality, **21** (1), 19-29.
- [23] Schmidt-Skipiol, F.J., & Hecker, P. (2015). *Tactile Feedback and Situation Awareness-Improving Adherence to an Envelope in Sidestick-Controlled Fly-by-Wire Aircrafts*. In 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (p. 2905).
- [24] Van Baelen, D., van Paassen, M.M., Ellerbroek, J., Abbink, D.A., & Mulder, M. (2021). *Flying by feeling: Communicating flight envelope protection through haptic feedback*. International Journal of Human-Computer Interaction, **37** (7), 655-665.
- [25] Ciáurriz, P., Díaz, I., & Gil, J.J. (2013, October). *Bimanual drive-by-wire system with haptic feedback*. In 2013 IEEE International Symposium on Haptic Audio Visual Environments and Games (HAVE) (pp. 18-23). IEEE.
- [26] Escobar-Castillejos, D., Noguez, J., Neri, L., Magana, A., & Benes, B. (2016). *A review of simulators with haptic devices for medical training*. Journal of medical systems, **40** (4), 1-22.
- [27] Ullrich, S., & Kuhlen, T. (2012). *Haptic palpation for medical simulation in virtual environments*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, **18** (4), 617-625.
- [28] Amirabdollahian, F., Livatino, S., Vahedi, B., Gudipati, R., Sheen, P., Gawrie-Mohan, S., & Vasdev, N. (2018). *Prevalence of haptic feedback in robot-mediated surgery: a systematic review of literature*. Journal of Robotic Surgery, **12** (1), 11-25.
- [29] Endo, T., Kawasaki, H., Mouri, T., Ishigure, Y., Shimomura, H., Matsumura, M., & Koketsu, K. (2010). *Five-fingered haptic interface robot: HIRO III*. IEEE Transactions on Haptics, **4** (1), 14-27.
- [30] Katila, J., Gan, Y., & Goodwin, M.H. (2020). *Interaction rituals and 'social distancing': New haptic trajectories and touching from a distance in the time of COVID-19*. Discourse Studies, **22** (4), 418-440.

- [31] Ligęza P. Monitor haptyczny. (2022) Zgłoszenie Patentowe P – 442165, UPRP
- [32] Ligęza, P. (2001). *Układy termoanemometryczne-struktura, modelowanie, przyrządy i systemy pomiarowe* (Doctoral dissertation, Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie).
- [33] Ligęza, P., Poleszczyk, E., & Skotniczny, P. (2008). *Measurements of velocity profile in headings with the use of integrated hot-wire anemometric system*. Archives of Mining Sciences, **53** (1), 87-96.
- [34] Ligęza, P., Poleszczyk, E., & Skotniczny, P. (2009). *Method and the system of spatial measurement of velocity field of air flow in a mining heading*. Archives of Mining Sciences, **54** (3), 419-440.
- [35] Ligęza, P. (2020). *Static and dynamic parameters of hot-wire sensors in a wide range of filament diameters as a criterion for optimal sensor selection in measurement process*. Measurement, **151**, 107177.

## Haptic monitor built on the basis of a system of air nozzles with thermobimetallic valves

### Summary

Haptic systems are devices that stimulate the sense of touch. They affect the somatosensory receptors of the skin of living organisms. Haptic monitors are the output systems of technical devices, enabling the transfer of information and communication with the recipient, in particular with a human being. In haptic monitors, it is important to be able to convey a sufficiently large amount of information in a precise and unambiguous way. The stimuli should be clearly perceptible, with the ability to localize the location of the stimulus and its amplitude. Haptic monitors, depending on the purpose and the required properties and parameters, use various sources of tactile stimulus. The article presents the concept of an innovative haptic monitor transmitting information by means of controlled air streams.

**Keywords:** haptic, sense of touch, machine-human information transfer, haptic monitor, air jets, thermal bimetallic valves