

doi:10.15199/48.2019.11.40

Telemetryczny system do pomiarów efektywności energetycznej wentylacji

Streszczenie. W artykule przedstawiono oryginalny system telemetryczny dedykowany do pomiarów efektywności energetycznej wentylacji mechanicznej. Jego konstrukcja umożliwia łatwe wykonywanie pomiarów w miejscu zamontowania wentylacji.

Abstract. The article describes the original dedicated telemetry system measuring the energy efficiency of the mechanical ventilation. Its design allows for easy measurement taking at the site of the ventilation's installation. **Telemetric system for measurements of ventilation's energy efficiency.**

Słowa kluczowe: system telemetryczny, efektywność energetyczna, rekuperacja, wentylacja.

Keywords: telemetry system, energy efficiency, recuperation, ventilation.

Wstęp

Podstawowym zadaniem systemu wentylacji mechanicznej jest zapewnienie określonej intensywności wymiany powietrza, czyli zastępowanie powietrza „zużytego” z wnętrza powietrzem „świeżym” z zewnątrz budynku. Temperatura i wilgotność powietrza wewnątrz budynków zwykle jest regulowana w zadanych zakresach, natomiast na zewnątrz parametry atmosfery zależą od aktualnych warunków pogodowych, zmiennych w okresach dobowych i rocznych. W warunkach typowych dla klimatu na terenie Polski temperatury otoczenia na ogół różnią się od zadanych temperatur wewnątrz budynków. W celu zmniejszenia strat energii stosuje się wymienniki ciepła. Pomiar rzeczywistych parametrów eksploatacyjnych tych wymienników jest istotny z punktu widzenia bilansu energetycznego i ekonomicznego [4]. Oczywiście w bardziej rozbudowanych centralach wentylacyjnych występują wbudowane systemy pomiarowe. Mierzą one jednak przeważnie tylko temperaturę powietrza. Jest to niewystarczające do określenia efektywności energetycznej rekuperatora, ponieważ jest ona obliczana zgodnie ze wzorem (1).

$$(1) \quad A = \frac{h_N - h_C}{h_W - h_C} 100\%$$

Gdzie: A – współczynnik efektywności energetycznej rekuperatora w [%], h_N – entalpia powietrza na wlocie kanału nawiewu, h_W – entalpia powietrza na wlocie kanału wywiewu, h_C – entalpia powietrza z czepni.

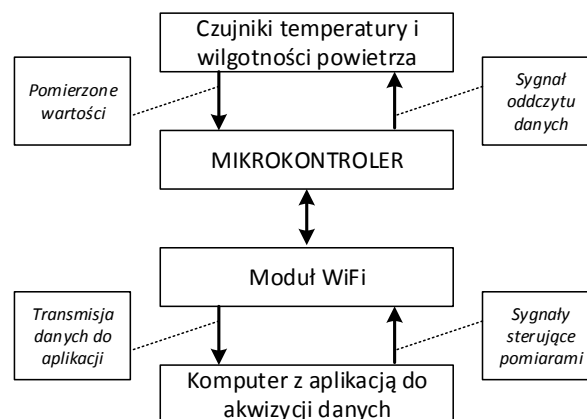
Do obliczenia entalpii niezbędne są więc pomiary temperatury i wilgotności powietrza [2]. W nielicznych przypadkach wentylacji mechanicznej z rekuperacją występują układy mierzące temperaturę i wilgotność względną powietrza, ale dokładność pomiaru i zróżnicowanie parametrów każdego z czujników powoduje, że efektywność energetyczna jest obliczana z dużymi błędami. Dokładne pomiary efektywności energetycznej wykonywane są praktycznie tylko w warunkach laboratoryjnych [5].

System pomiarowy

Do analizy efektywności energetycznej wentylacji mechanicznej konieczne są więc pomiary i rejestracja z odpowiednią częstotliwością przepływu powietrza, temperatury i wilgotności powietrza w wybranych punktach oraz poboru energii elektrycznej. Dla ustalonego stanu pracy wentylacji wystarczający jest pomiar mocy elektrycznej potrzebnej do zasilania rekuperatora, ciśnienia

i przepływu powietrza w jednym punkcie. Największym wyzwaniem jest rejestracja parametrów powietrza w kilku punktach. W przypadku rekuperatora konieczny jest pomiar na wlocie i wlocie nawiewu, na wlocie wywiewu oraz dodatkowo na wlocie gruntowego wymiennika ciepła, jeśli występuje w systemie. Oznacza to konieczność rejestracji z częstością od 1 do 10 pomiarów na minutę z czterech czujników temperatury i wilgotności rozmieszczonych względem siebie w odległości do kilku metrów [3]. Oprzyrządowanie zapewniające takie pomiary jest relatywnie drogie i na ogół kłopotliwe w użyciu. W związku z powyższym opracowano mobilne urządzenie spełniające wymagania pomiarowe oraz ergonomiczne przy niewielkich kosztach.

System pomiarowy składa się z urządzenia telemetrycznego oraz komputera z aplikacją. Moduł telemetryczny zawiera: mikrokontroler zarządzający pomiarami, układ do komunikacji bezprzewodowej z komputerem, cztery zintegrowane czujniki temperatury i wilgotności. Schemat funkcjonalny przedstawia rys.1. Całość skonstruowana na bazie mikrokontrolera Atmega 328P [1]. Moduł taktowany jest generatorem kwarcowym o częstotliwości 16 MHz i posiada 14 cyfrowych wejść/wyjść oraz 6 wejść analogowych. Komunikację bezprzewodową zapewnia moduł WiFi ESP8266, pracujący w standardzie 802.11 b/g/n na typowej częstotliwości 2,4 GHz.



Rys.1. Schemat funkcjonalny systemu telemetrycznego

Pomiar temperatury i wilgotności zapewniają cztery czujnik firmy Sensirion z serii SHT. Są one czujnikami pojemnościowymi, które w przeciwieństwie do czujników rezystancyjnych wilgotności mogą być używane

w środowisku z kondensacją pary wodnej. Dzięki użyciu pojemnościowej metody pomiaru w czujnikach serii SHT możliwe jest też uzyskanie wysokiego poziomu dokładności pomiarowej [6], [7], [8]. Właściwości czujnika SHT11: zintegrowane czujniki temperatury i wilgotności powietrza, możliwość precyzyjnego pomiaru punktu rosy, programowalna rozdzielczość pomiaru temperatury 12 lub 14 bitów, programowalna rozdzielczość pomiaru wilgotności 8 lub 12 bitów, pomiar temperatury z dokładnością $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ dla temperatury $-40 - 123,8^{\circ}\text{C}$, pomiar wilgotności z dokładnością $\pm 3\%$ w zakresie wilgotności względnej od 0% do 100%, odporny na zakłócenia elektromagnetyczne. Odległość kilku metrów pomiędzy czujnikami a mikrokontrolerem nie wpływa na dokładność pomiarów, ponieważ przetwornik A/C jest zintegrowany z czujnikiem a przewodem przesyłany jest sygnał w postaci cyfrowej.

Zadaniem urządzenia jest pomiar z zadaną częstotliwością i transmisja danych do komputera. Oprogramowanie modułu zostało oparte na narzędziach programistycznych oraz dedykowanych bibliotekach udostępnianych przez producenta mikrokontrolera, które umożliwiają programowanie mikrokontrolerów poprzez interfejs szeregowy oraz zewnętrzny programator.

Do zarządzania pomiarami oraz bezprzewodową akwizycją i rejestracją danych pomiarowych konieczna była aplikacja komputerowa, którą utworzono w języku C# z wykorzystaniem środowiska programistycznego Visual Studio oraz platformy .NET.

W efekcie powstał czterokanałowy system pomiarowy, umożliwiający rejestrację parametrów roboczych i analizę efektywności energetycznej rekuperatora, który jest przedstawiony na rys.2.

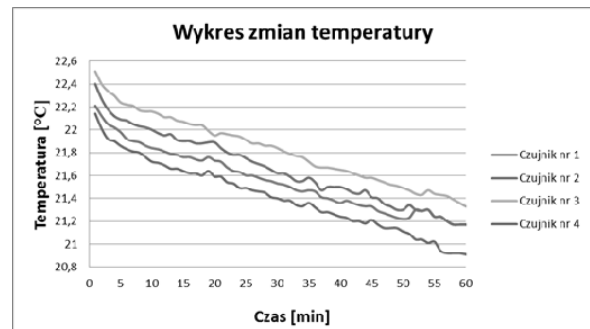


Rys.2. System pomiarowy w trakcie rejestracji parametrów roboczych rekuperatora

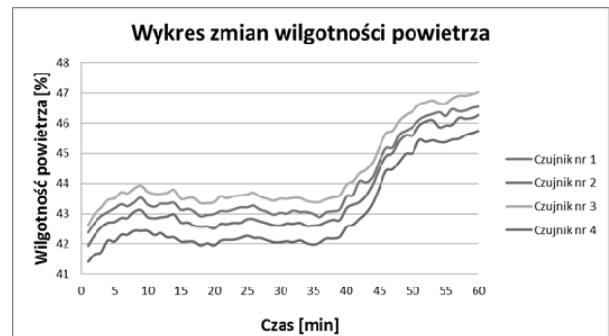
Testy systemu telemetrycznego

W celu weryfikacji dokładności wykonano pomiar temperatury i wilgotności powietrza w pomieszczeniu zamkniętym w warunkach stabilnych w czasie około jednej godziny, z odstępem między pomiarami jedna minuta. Wyniki przedstawiono na rys 3 i 4.

Można zauważyć, że zastosowane zintegrowane czujniki pomiarowe temperatury i wilgotności powietrza charakteryzuje pewien błąd systematyczny, zależny od mierzonych wartości, istotnie wpływający na wyniki obliczeń efektywności energetycznej. Przykładowo, dla pomiarów w identycznych warunkach zamiana czujników powodowała zmianę wyników obliczonej wartości sprawności rekuperatora nawet o 4%. Tak dużych błędów, wynikających z niedostatecznej kalibracji wstępnej czujników, nie można było zaakceptować.



Rys. 3. Wykres zmian temperatury



Rys. 4. Wykres zmian wilgotności względnej powietrza

Badania metrologiczne

W celu minimalizacji błędów systematycznych wykonano badania w komorze klimatycznej przyjmując założenie, że wskazania mierników w homologowanej komorze są wartościami wzorcowymi. Pozwoliło to na ustalenie relacji między wartościami wielkości mierzonej, a wartościami wykazanymi przez wzorzec oraz określenie błędów pomiaru. W doświadczeniu wykorzystany został wzorzec wilgotności względnej i temperatury: Vaisala HMT 330 mający dokładność pomiaru wilgotności $\pm 1\%$ i temperatury $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$, który jest wykorzystywany do wzorcowania sprzętu pomiarowego i jest on regularnie kalibrowany przez krajowy wzorzec wilgotności względnej i temperatury. Badania zostały wykonane w Zakładzie Kalibracji Przyrządów Pomiarowych Wielkości Fizycznych Centralnego Wojskowego Ośrodka Metrologii w Warszawie dzięki udostępnieniu przyrządów: zadajnik temperatury i wilgotności względnej - komora klimatyczna (termiczna) WK3-340/70 (WEISS); wzorzec temperatury i wilgotności względnej: Vaisala HMT 330, typ J2830101. W badaniach metrologicznych systemu telemetrycznego zostały tak przyjęte punkty pomiarowe, aby zakres temperatury i wilgotności obejmował naturalne wartości: 15°C , 20°C , 25°C , 30°C , 40°C , 50°C dla wilgotności względnej 30%, 60% i 90%. Dzięki umieszczeniu czujników na specjalnym stolezku obok wzorca oraz wykonaniu pomiarów po ustabilizowaniu się pracy urządzenia zadającego, możliwość wystąpienia jakichkolwiek dodatkowych błędów została zminimalizowana. Przykładowe wyniki badań przedstawiono w Tabeli 1.

Na tej podstawie określono poprawki dla każdego czujnika temperatury i wilgotności względnej, które przedstawiono w tabelach 2, 3, 4 i 5. W tabelach wprowadzono skróty: PT – poprawka pomiaru temperatury; PW – poprawka pomiaru wilgotności względnej.

Tabela 1. Wyniki badań dla wilgotności względnej 60%

wskazania wzorca		wskazania czujnika		
temperatura	wilgotność	Nr.	temperatura	Wilgotność
15,46°C	62,45%	1	15,93°C	64,67%
		2	16,10°C	64,66%
		3	16,16°C	64,13%
		4	15,81°C	63,89%
wskazania wzorca		wskazania czujnika		
temperatura	wilgotność	Nr.	temperatura	wilgotność
20,50°C	61,50%	1	20,96°C	64,40%
		2	21,10°C	64,21%
		3	21,15°C	63,90%
		4	20,61°C	63,52%
25,52°C	60,88%	1	25,99°C	64,06%
		2	26,09°C	63,92%
		3	26,16°C	63,64%
		4	25,60°C	63,18%
30,51°C	60,38%	1	31,00°C	63,61%
		2	31,12°C	63,44%
		3	31,19°C	63,24%
		4	30,57°C	62,68%
40,43°C	59,42%	1	40,98°C	62,74%
		2	41,09°C	62,56%
		3	41,09°C	62,44%
		4	40,47°C	61,77%
50,33°C	59,84%	1	51,03°C	62,86%
		2	51,09°C	62,64%
		3	51,09°C	62,65%
		4	50,43°C	61,82%

Tabela 2. Poprawki pomiaru wilgotności i temperatury czujnika 1

temperatura T[°C]	Wilgotność względna φ[%]					
	30		60		90	
	PW30	PT30	PW60	PT60	PW90	PT90
15	-5,24	-0,38	-2,22	-0,47	2,32	-0,50
20	-4,82	-0,41	-2,90	-0,46	1,30	-0,43
25	-4,78	-0,46	-3,18	-0,47	0,84	-0,46
30	-4,89	-0,45	-3,23	-0,49	0,34	-0,40
40	-4,73	-0,54	-3,32	-0,55	0,48	-0,51
50	-4,40	-0,68	-3,02	-0,70	0,08	-0,56

Tabela 3. Poprawki pomiaru wilgotności i temperatury czujnika 2

temperatura T[°C]	Wilgotność względna φ [%]					
	30		60		90	
	PW30	PT30	PW60	PT60	PW90	PT90
15	-4,89	-0,56	-2,21	-0,64	2,24	-0,42
20	-4,46	-0,54	-2,71	-0,60	1,26	-0,39
25	-4,41	-0,59	-3,04	-0,57	0,81	-0,43
30	-4,48	-0,56	-3,06	-0,61	0,35	-0,37
40	-4,30	-0,68	-3,14	-0,66	0,60	-0,45
50	-3,97	-0,79	-2,80	-0,76	0,20	-0,73

Tabela 4. Poprawki pomiaru wilgotności i temperatury czujnika 3

temperatura T[°C]	Wilgotność względna [%]					
	30		60		90	
	PW30	PT30	PW60	PT60	PW90	PT90
15	-4,68	-0,56	-1,68	-0,70	2,69	-0,68
20	-4,32	-0,56	-2,40	-0,65	1,53	-0,66
25	-4,34	-0,59	-2,76	-0,64	1,09	-0,68
30	-4,41	-0,61	-2,86	-0,68	0,56	-0,64
40	-4,38	-0,66	-3,02	-0,66	0,54	-0,68
50	-4,04	-0,73	-2,81	-0,76	0,12	-0,75

Tabela 5. Poprawki pomiaru wilgotności i temperatury czujnika 4

temperatura T[°C]	Wilgotność względna [%]					
	30		60		90	
	PW30	PT30	PW60	PT60	PW90	PT90
15	-4,10	-0,13	-1,44	-0,35	2,82	-0,18
20	-3,69	-0,06	-2,02	-0,11	1,66	-0,13
25	-3,67	-0,05	-2,30	-0,08	1,28	-0,07
30	-3,65	-0,02	-2,30	-0,06	0,89	0,00
40	-3,45	-0,03	-2,35	-0,04	1,06	-0,06
50	-3,01	-0,13	-1,98	-0,10	0,81	-0,01

Określenie funkcji aproksymujących poprawki

Pomiary wzorcowe zostały wykonane dla 15 charakterystycznych punktów, natomiast rzeczywiste wyniki pomiarów roboczych będą obejmowały także wartości pośrednie. Ustalenie poprawek dla dowolnej, pomierzonej wartości wymaga więc określenia funkcji dwóch zmiennych aproksymującej poprawki, która zapewni minimalizację błędów systematycznych. Jako kryteria przyjęto:

- minimum wartości bezwzględnej uchybu średniego;
- minimum uchybu średniokwadratowego;
- łatwość implementacji funkcji.

Po analizie kilku typów funkcji do aproksymacji wartości poprawek przyjęto funkcję wielomianową 2 rzędu zależność od temperatury, przy czym dla współczynników funkcji kwadratowej przyjęto liniową zależność od wilgotności powietrza [9]. Przy wyborze typu funkcji uwzględniono fakt, że wartości wzorcowe poprawek były określone dla 5 różnych temperatur oraz 3 różnych wilgotności względnych. W efekcie otrzymano funkcję poprawek dla pomiarów temperatury określoną wzorem ogólnym (2).

$$(2) P_{Tn} = (a_{2n}\varphi + b_{2n})T^2 + (a_{1n}\varphi + b_{1n})T + (a_{0n}\varphi + b_{0n})$$

gdzie: P_{Tn} – poprawka pomiaru temperatury dla n-tego czujnika, T – wartość temperatury powietrza w [°C] uzyskana w wyniku pomiaru, φ – wartość wilgotności względnej powietrza w [%] uzyskana w wyniku pomiaru, a_{2n} , a_{1n} , a_{0n} , b_{2n} , b_{1n} , b_{0n} – współczynniki funkcji aproksymującej dla n-tego czujnika.

Wartości współczynników funkcji aproksymującej dla pomiaru temperatury przedstawiono w Tabeli 6.

Tabela 6. Współczynniki funkcji aproksymującej poprawki dla pomiaru temperatury

Czujnik N	wartości współczynników					
	a_{2n}	b_{2n}	a_{1n}	b_{1n}	a_{0n}	b_{0n}
1	-2,0E-06	-0,0002	0,0002	0,0004	-0,0033	-0,3476
2	-7,0E-06	3,0E-05	0,0004	-0,0029	-0,0021	-0,6062
3	-7,0E-06	3,0E-05	0,0002	-0,0023	-0,0043	-0,469
4	3,0E-06	0,0006	-7,0E-05	0,0336	-0,0003	-0,5366

Analogicznie ustalono funkcję poprawek dla pomiarów wilgotności względnej powietrza przedstawioną wzorem ogólnym (3).

$$(3) P_{\varphi n} = (c_{2n}\varphi + d_{2n})T^2 + (c_{1n}\varphi + d_{1n})T + (c_{0n}\varphi + d_{0n})$$

gdzie: $P_{\varphi n}$ – poprawka pomiaru wilgotności względnej dla n-tego czujnika, T – wartość temperatury powietrza w [°C] uzyskana w wyniku pomiaru, φ – wartość wilgotności względnej powietrza w [%] uzyskana w wyniku pomiaru, c_{2n} , c_{1n} , c_{0n} , d_{2n} , d_{1n} , d_{0n} – współczynniki funkcji aproksymującej dla n-tego czujnika.

Wartości współczynników funkcji aproksymującej dla pomiaru wilgotności względnej przedstawiono w Tabeli 7.

Tabela 7. Współczynniki funkcji aproksymującej poprawki dla pomiaru wilgotności względnej.

czujnik n	wartości współczynników					
	c_{2n}	d_{2n}	c_{1n}	d_{1n}	c_{0n}	d_{0n}
1	5,0E-05	-0,0011	-0,0042	0,1269	0,1734	-10,645
2	5,0E-05	-0,0011	-0,0042	0,1346	0,1653	-10,2
3	5,0E-05	-0,001	-0,0043	0,1144	0,1706	-10,101
4	5,0E-05	-0,0011	-0,0043	0,1348	0,1636	-9,2929

Określenie poprawek w postaci funkcji umożliwiło implementację ich w oprogramowaniu i w efekcie znaczące zmniejszenie błędów systematycznych oraz ujednoczenie charakterystyk czujników tak, by losowy ich dobór nie wpływał na wyniki pomiarów.

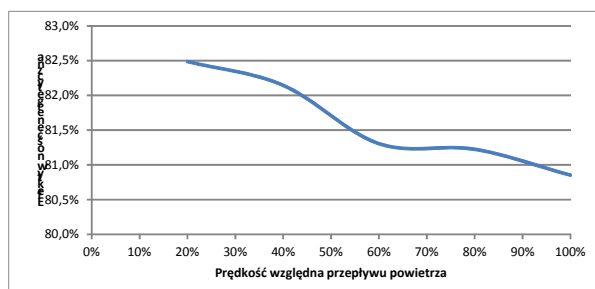
Przykładowe pomiary

Opracowany system pomiarowy, złożony z modułu telemetrycznego oraz komputera po dodatkowym skalibrowaniu zintegrowanych czujników temperatury i wilgotności powietrza został użyty do wykonania pomiarów efektywności energetycznej wentylacji z rekuperatorem. Przykład stanowiska z podłączonymi czujnikami na wlotach i wylotach nawiewu i wywiewu badanego rekuperatora przedstawia rys.5.



Rys. 5. Zdjęcia centrali wentylacyjnej z podłączonymi czujnikami

Na podstawie zarejestrowanych pomiarów określono zależność współczynnika efektywności energetycznej od prędkości przepływu powietrza (rys.6.).



Rys. 6. Wykres efektywności energetycznej w funkcji przepływu powietrza

Opracowany system telemetryczny był też użyty do monitorowania efektywności energetycznej w kilku innych centralach wentylacyjnych z rekuperacją a w jednym przypadku także z gruntowym wymiennikiem ciepła.

Podsumowanie

Przedstawiony system telemetryczny przy niskim koszcie wykonania spełnia wymagania metrologiczne do pomiarów i monitorowania efektywności energetycznej. Przede wszystkim jednak jest mobilny, współpracuje praktycznie z każdym komputerem i zawiera zsynchronizowane ze sobą w jednym systemie cztery czujniki temperatury i wilgotności względnej na przewodach o długości 3m, co umożliwia łatwe pomiary na systemach

wentylacji w miejscu ich wybudowania. Badania takie mogą dostarczyć interesujących informacji, przede wszystkim dla użytkowników i projektantów central. Na podstawie dotychczas wykonanych badań można stwierdzić, że:

- parametry katalogowe sprawności energetycznej są na ogół zawyżone;
- sterowniki istniejących central wentylacyjnych mają co najmniej nieoptymalnie algorytmy sterowania przełączaniem rekuperator / bajpas lub GWC / czerpnia zewnętrzna.

Ponadto na podstawie kilkumiesięcznych pomiarów parametrów energetycznych centrali oraz danych meteorologicznych można określić model sprawności centrali umożliwiający symulację efektywności energetycznej i ekonomicznej poszczególnych elementów systemów wentylacji.

Najbardziej interesująca wydaje się jednak funkcja ciągłego monitorowania pracy centrali wentylacyjnej i wykorzystanie tych informacji w procesie jej eksploatacji. Monitorowanie parametrów roboczych i pogodowych umożliwiłoby porównanie sprawności w różnych okresach i wnioskowanie o zanieczyszczeniu, rozszczelnieniu lub starzeniu się rekuperatora, co pozwoliłoby optymalizować obsługiwane.

Docelowo pożądana byłaby wersja wbudowana systemu pomiarowego, która uzupełniałaby istniejące sterowniki i optymalizowałaby eksploatację zarówno w zakresie sterowania jak i obsługiwanie.

Autor: dr inż. Wiktor Olchowik, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, e-mail: wiktor.olchowik@wat.edu.pl;

LITERATURA

- [1] Anderson R., Cervo D., Arduino dla zaawansowanych, *Helion, Gliwice* (2014)
- [2] Fodemski T. R., Pomiary cieplne cz.2 Badania cieplne maszyn i urządzeń, *WNT, Warszawa*, (2009)
- [3] Iwasińska-Kowalska O., Metrologiczne podejście do doboru narzędzia pomiarowego, *Pomiary Automatyka Robotyka*, 11/2014, 97-101
- [4] Herring H., Energy efficiency - a critical view, *Energy*, vol. 31, Issue 1, (2006), 10-20
- [5] Koziół S., Zborowski A., System for the Measurement of Efficiency of Heat Recuperation in Ventilation Systems in Energy Efficient Buildings, *Solid State Phenomena*, vol. 223, (2014), 308-315
- [6] Walczak S., Gołębiowski J., Milcarz S. Projektowanie elastycznych elektronicznych czujników temperatury, *Przegląd Elektrotechniczny*, 02/2015, 236
- [7] Meijer G., Wang G., Heidary A., 3 - Smart temperature sensors and temperature sensor systems, *Smart Sensors and MEMS, Intelligent Devices and Microsystems for Industrial Applications*, a vol. in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials Book 2nd Edition, (2018)
- [8] Lebioda M., Rymaszczyński J., Właściwości dynamiczne czujników temperatury w warunkach kriogenicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 02/2015, 225
- [9] Warsza Z. L., Puchalski J., Estymacja niepewności charakterystyki z pomiarów w punktach kontrolnych, *Pomiary Automatyka Robotyka*, R. 22, nr 4, (2018) 39 – 50