



Nowa konstrukcja automatycznego komparatora masy z działką elementarną 10 ng

Radwag Metrology Research and Certification Center, Poland
M.Sc. Michał Solecki, dr Sławomir Janas



Odmierzanie coraz to mniejszych ilości w skali mikro oraz nano wymaga nie tylko super dokładnych urządzeń pomiarowych ale także adekwatnych metod dla okresowej kontroli procesu ważenia. Wzorce masy o nominałach poniżej 1 mg mogą być tu pomocne, ale kluczowa jest metodyka wyznaczania ich masy. Zastosowanie wag lub komparatorów masy o działce elementarnej 0.1 μg podczas produkcji takich wzorców może być niewystarczające, głównie ze względu na niepewność wyznaczenia masy wzorca. Mając to na uwadze Radwag opracował nową konstrukcję nano-komparatora masy serii NANO.AK-4.500.5Y z działką elementarną $d=0.01\mu\text{g}$ (10 nanogramów). Niniejsza publikacja ma na celu przedstawienie metrologicznych aspektów nano komparatora masy, co może być pierwszym krokiem dla jego komercyjnych zastosowań w laboratoriach naukowo-badawczych czy tych związanych z metrologią naukową i prawną.

Copyright by RADWAG Wagi Elektroniczne
Radom 2023
Wydanie I
RADWAG Wagi Elektroniczne
26-600 Radom, ul. Toruńska 5
Tel. 48 48 38 48 800, fax 48 48 385 00 10
e-mail: radom@radwag.pl
<http://www.radwag.pl>

1. WSTĘP

Rozwój metrologii i konstrukcji wagowych w zakresie pomiarów masy jest obecnie na dość wysokim poziomie gdyż standardem są mikrowagi które powtarzalnie pozwalają określać masę różnych obiektów przy rozdzielczości pomiarowej 20 – 50 mln działek elementarnych np. mikrowaga MYA 21.5Y. Z metrologicznego punktu widzenia możliwość określenia masy z wysoką precyzją rzędu np. 0.5 mikrograma jest tylko połową sukcesu, gdyż o dokładności pomiaru masy decyduje także błąd systematyczny wagi będący efektem potencjalnych zmian jej czułości. Wprawdzie standardem jest obecnie tzw. adiustacja wewnętrzna, ale weryfikacja jej poprawności działania powinna być dokonana wzorcem zewnętrznym. Wzorzec jako referencyjny punkt odniesienia dla wielu kontroli metrologicznych zdefiniowany jest poprzez rzeczywistą wartość masy oraz niepewność jej wyznaczenia a głównymi składnikami budżetu niepewności są działka elementarna komparatora masy, jego powtarzalność oraz niepewność wzorca odniesienia. Można zatem powiedzieć że wyprodukowanie coraz „dokładniejszych” wzorców masy wymaga zastosowania coraz „dokładniejszych” urządzeń pomiarowych – wag, komparatorów masy.



Rysunek 1. Rozdzielczość ultra-mikrowagi UYA 2.5Y w obszarze metrologii prawnej

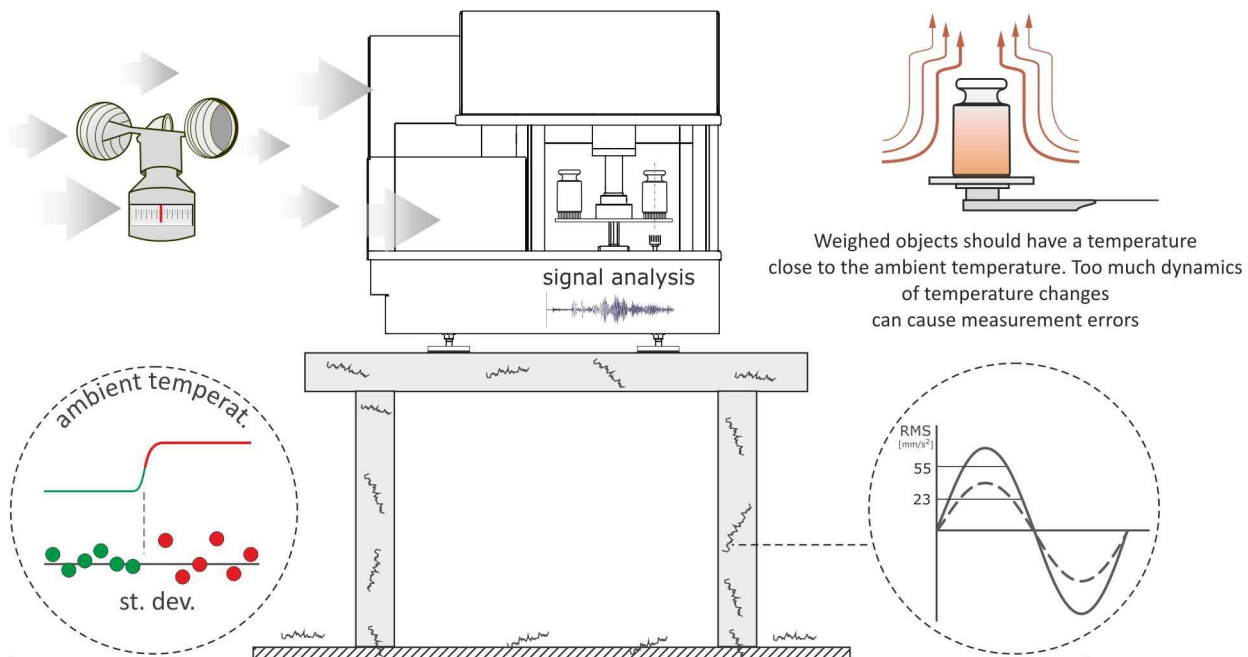
Podobne zależności występują także w metrologii prawnej. Norma OIML R111-1 roku określa maksymalne dopuszczalne błędy dla odważników o tzw. małych masach (tabela 1) podając jednocześnie maksymalną rozszerzoną niepewność wyznaczenia masy każdego odważnika (pkt. 5.2 OIML R 111-1). W przypadku odważników o masach w zakresie 20 mg ÷ 1 mg maksymalny błąd określenia ich masy wynosi ± 0.003 mg przy niepewności 0.001 mg. Podczas kontroli masy takich odważników możliwe jest zastosowanie ultra-mikrowag lub komparatorów masy z działką elementarną $d=0.1\mu\text{g}$, ale ich powtarzalność zależnie od typu zawiera się w zakresie 0.15 ÷ 0.5 μg co może stanowić nawet ok. 50 % budżetu niepewności.

Wnioskiem z takich zależności jest realna potrzeba zastosowania wagi / komparatora masy o mniejszej działce elementarnej oraz lepszej powtarzalności wskazań. Mając to na uwadze Radwag jako czołowy producent wag i komparatorów masy jako pierwszy przedstawił nową konstrukcję nano-komparatora masy o obciążeniu maksymalnym 500 mg. Można mieć zatem nadzieję że postęp technologiczny i metrologiczny w zakresie mierzenia małych wartości znajdzie swoje miejsce także w metrologii prawnej.

Tabela 1. Maksymalne dopuszczalne błędy dla odważników ($\pm \delta m$ w mg)

Masa nominalna (mg)	Klasa dokładności / maksymalny błąd dopuszczalny (\pm mg)			
	E1	E2	F1	F2
1000	0,01	0,03	0,1	0,30
500	0,008	0,025	0,08	0,25
200	0,006	0,02	0,06	0,20
100	0,005	0,016	0,05	0,16
50	0,004	0,012	0,04	0,12
20	0,003	0,01	0,03	0,10
10	0,003	0,008	0,025	0,08
5	0,003	0,006	0,020	0,06
2	0,003	0,006	0,020	0,06
1	0,003	0,006	0,020	0,06

Należy jednak pamiętać, że precyzja każdego pomiaru jest silnie zależna od warunków badania (temperatura, wilgotność, wibracje) oraz od stabilności wagi / komparatora (Rysunek 2).



Rysunek 2. NANO.AK-4.500.5Y – czynniki wpływające na proces pomiaru masy

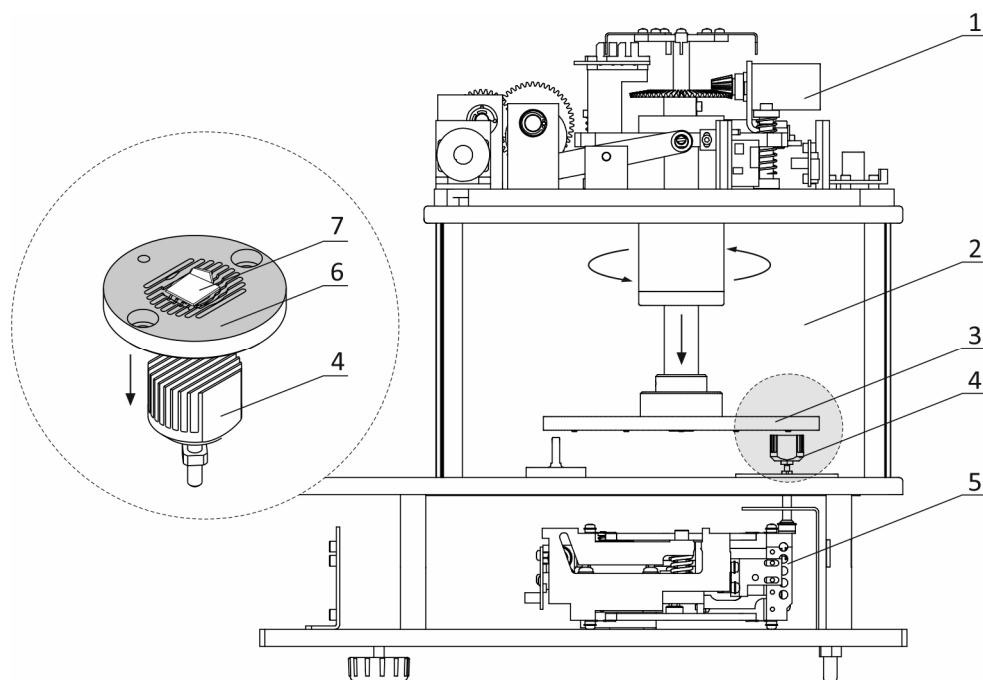
2. Konstrukcja komparatora NANO.AK-4.500.5Y

Jednym z elementów gwarantujących poprawną komparatora masy jest stabilność środowiska pracy głównie w aspekcie wilgotności i temperatury. Zmienność tych dwóch czynników jest zdefiniowana w OIML R 111-1 (tabela 2) i dotyczy raczej zmian jakie mogą zachodzić w obiekcie badanym czyli odważniku – rozszerzalność cieplna, efekty sorpcji wilgoci itd.

Tabela 2. Temperatura otoczenia podczas wzorcowania odważników (wartości rekomendowane)

Klasa odważnika	Zmiana temperatury podczas wzorcowania		Zmiana wilgotności podczas wzorcowania	
	w czasie 1 godziny	w czasie 12 godzin	zakres wilgotności	Max. / 4 godziny
E1	$\pm 0,3$ °C	$\pm 0,5$ °C	od 40 % do 60 %	± 5 %
E2	$\pm 0,7$ °C	$\pm 1,0$ °C		± 10 %
F1	$\pm 1,5$ °C	$\pm 2,0$ °C		± 15 %
F2	$\pm 2,0$ °C	$\pm 3,5$ °C		
M1	$\pm 3,0$ °C	$\pm 5,0$ °C	x	x

Należy jednakże zauważyć że zmienność wilgotności i temperatury jest czynnikiem negatywnym także dla komparatora masy. Zbyt duża zmiana temperatury otoczenia generuje zmiany liniowe układu mechanicznego komparatora a dynamiczna zmiana wilgotności wpływa istotnie na niestabilność wskazań, głównie w efekcie sorpcji lub desorpcji wilgoci przez elementy konstrukcyjne komparatora masy. Skutkiem występowania tych czynników jest znacznie gorsza precyzja pomiarów. Budowa nano-komparatora AK-4/500.5Y została przedstawiona na rysunku 3.



Rysunek 3. Szkic komparatora NANO.AK-4.500.5Y

Legenda: 1- układ sterowania, 2- komora wagowa, 3- magazyn wzorców masy, 4-szalka komparatora, 5- magnetoelektryczny układ pomiarowy wysokiej rozdzielczości, 6-gniazdo odważnika, 7-odważnik

Ruchem magazynu wzorców (3) steruje układ automatyki (1) zainstalowany w górnej części komparatora masy. Po umieszczeniu odważników / wzorców masy w magazynie (3) rozpoczyna się proces komparacji, który można dowolnie zdefiniować w zakresie:

- metody komparacji ABA, ABBA
- ilości powtórzeń w cyklu ABA, ABBA np. 6xABBA
- ilości powtórzeń cyklu komparacji np. 10x(6xABBA)
- czasu rozpoczęcia komparacji
- wyboru porównywanych odważników
- innych parametrów związanych procesem komparacji

Wewnątrz magazynu wzorców (3) znajdują się cztery ażurowane gniazda (6) wewnątrz których umieszcza się badane odważniki (7). Wykorzystując pulpit operatora należy zdefiniować plan komparacji wykorzystując informacje zawarte w bazie danych. Komora wagowa (2) komparatora masy musi być zamknięta podczas badań co zapewnia minimalizację negatywnego wpływu niekontrolowanego ruchu powietrza. Jak wspomniano wcześniej podczas komparacji wymagane są bardzo stabilne warunki pracy ale dąży się do takiej optymalizacji konstrukcji komparatora która zapewnia maksymalną stabilność wskazań niezależnie od warunków zewnętrznych. Po zakończeniu komparacji wszystkie informacje związane z przeprowadzonym badaniem są automatycznie zapisywane w bazie danych. Te informacje można skopiować zdalnie poprzez WiFi, Ethernet lub przenieść do zewnętrznej pamięci USB. Przykład raportu z pojedynczego cyklu ABBA pokazano poniżej.

----- Komparator -----

Użytkownik	Admin
Imię i nazwisko	SJ
Nr raportu	C/01/11/22/14/48
Data rozpoczęcia	2023.04.20 14:48:49
Data zakończenia	2023.04.20 15:42:57
Wzorzec badany	50mg
Numer zlecenia	A-654
Numer wzorca badanego	x
Pozycja wzorca badanego	B2
Wzorzec odniesienia	500mg
Masa	50.000012 g
Klasa wzorca odniesienia	E1
Pozycja wzorca odniesienia	A1

n	A	B	B	A	D
1	-0.00000180	0.00001390	0.00001380	-0.00000180	0.00001565
2	-0.00000180	0.00001400	0.00001400	-0.00000160	0.0000157
3	-0.00000160	0.00001400	0.00001400	-0.00000160	0.0000156
4	-0.00000170	0.00001400	0.00001410	-0.00000160	0.0000157
5	-0.00000160	0.00001420	0.00001430	-0.00000130	0.0000157
6	-0.00000120	0.00001450	0.00001450	-0.00000110	0.00001565

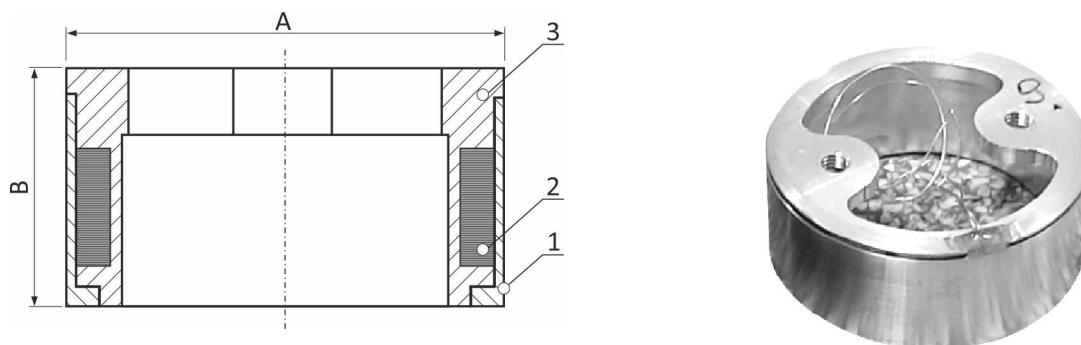
Średnia różnica	0.000015666667 g
Odchylenie standardowe	0.000000040825 g
Liczba cykli	6

Metoda	ABBA
Temperatura min	22.13°C
Temperatura max	22.31°C
Wilgotność min	44.8%
Wilgotność max	45.9%
Ciśnienie min	998.2hPa
Ciśnienie max	998.2hPa



Rysunek 4. Rejestracja i wizualizacja parametrów środowiskowych podczas komparacji (22.04.2023)

Jednym z kluczowych elementów konstrukcyjnych komparatora masy jest układ siłownika magnetoelektrycznego z cewką. Cewka ze względu na swoją konstrukcję i miejsce w układzie mechanicznym jest szczególnie wrażliwa na zmiany wilgotności względnej. Mając to na uwadze w komparatorze NANO.AK-4.500.5Y zastosowano innowacyjne rozwiązanie cewki (Rysunek 5) z osłoną dzięki któremu ograniczono istotnie procesy sorpcji i desorpcji wilgoci przez ten element. Badania dotyczące stabilności masy cewek w zmiennych warunkach wilgotności przedstawiono w kolejnych częściach pracy.



Rysunek 5. Widok i budowa cewki

1- ring zabezpieczający; 2 – zwoje cewki; 3 – obudowa cewki
(Cewka S10: A=16.5 mm, B=9 mm, S20: A=30 mm, B=12 mm)

2.2. Konstrukcja mechaniczna siłownika

Dokładny skład materiału z którego wykonany jest magnes siłownika jest tajemnicą producenta. RADWAG przetestował wiele rodzajów magnesów i tylko ten zastosowany w komparatorze NANO.AK-4.500.5Y spełnia wymagania w zakresie stabilności pola magnetycznego przy zmianach temperatury. Dlaczego jest to istotne?

Jeżeli w momencie wzrostu lub spadku temperatury nastąpi znacząca zmiana siły magnesu, doprowadzi to do zmiany wyniku masy badanego obiektu na wadze lub komparatorze.

3. OPTIMALIZACJA KONSTRUKCJI – BADANIA SORPCJI WILGOCI

Badanie zmian masy cewek w efekcie zmian wilgotności względnej przeprowadzono dla cewek stosowanych w typowych wagach laboratoryjnych w porównaniu do cewki jaką zastosowano w nano komparatorze automatycznym NANO.AK-4.500.5Y. W stabilnych warunkach temperatury i wilgotności określono masę cewek a następnie zwiększono wilgotność względną o 20 %. W warunkach zwiększonej wilgotności przeprowadzono kondycjonowanie badanych obiektów w czasie ponad 24 godziny. Na podstawie pomiarów masy cewek po okresie kondycjonowania oraz przed wzrostem wilgotności wyliczono przyrost masy, który był miernikiem podatności cewki na absorpcję wilgoci. Wyniki z badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki zmian masy dla różnych cewek zależnie od zastosowanego zabezpieczenia

Typ cewki	Zmiana masy podczas testu (mg/20%)		
	S20	S10	S10 AK-4/500.5Y
No. / system zabezpieczenia	ring	Brak	ring
1.	0.15	0.346	0.064
2.	0.16	0.346	0.057
3.	0.16	0.399	0.061
4.	0.16	0.390	0.055
5.	0.15	0.312	0.052
6.	0.15	0.331	0.048
7.	0.15	0.374	0.060
8.	0.15	0.378	0.045
9.	0.14	0.362	0.066
10.	0.12	0.348	0.057
\bar{x}	0.15	0.36	0.06
S	0.012	0.027	0.007

Z otrzymanych danych wynika jednoznacznie że najlepszą stabilizację masy uzyskano dla cewki S10 gdy była ona zabezpieczona dodatkowym pierścieniem uszczelniającym. Dzięki temu wpływ zmiennej wilgotności był około 6 razy mniejszy w porównaniu do tej samej cewki bez zabezpieczenia.

4. BADANIA METROLOGICZNE KOMPARATORA NANO.AK-4.500.5Y

Najważniejszym parametrem metrologicznym każdego komparatora masy jest precyzja pomiaru, która poprzez odchylenie standardowe pokazuje stopień rozproszenia pomiarów wokół wartości średniej. Im mniejsza wartość odchylenia standardowego tym lepsza precyzja. Ocenę precyzji dokonano dla wszystkich wzorców masy / odważników które mogą być komparowane.

4.1. METODA BADANIA

Procedura badania polegała na wyznaczeniu odchylenia standardowego dla 6 cykli ABBA powtórzonych pięciokrotnie. Każdy wzorec odniesienia oraz każdy odważnik badany był ważony 60-krotnie co pozwoliło obiektywnie ocenić stabilność i precyzję pomiaru masy komparatora przy zastosowaniu różnych obciążeń. Średnią różnicę r_i dla metody ABBA dla każdej i-tej serii pomiarów wyznaczono korzystając ze wzoru (1) oraz (2). Na podstawie uzyskanych różnic wyznaczono odchylenie standardowe dla różnic zgodnie ze wzorem (3).

$$\bar{r} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n r_i \quad (1)$$

gdzie: r_i średnia różnica (B-A) dla i-tego pomiaru
 \bar{r} średnia arytmetyczna różnic dla n pomiarów

$$r_i = \frac{[(B_i^{AB} - A_i^{AB}) + (B_i^{BA} - A_i^{BA})]}{2} \quad (2)$$

gdzie: $B_i^{AB} - A_i^{AB}$ – różnica mas w sekwencji AB
 $B_i^{BA} - A_i^{BA}$ – różnica mas w sekwencji BA

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

gdzie: n – ilość pomiarów w metodzie ABBA

4.2. STANOWISKO POMIAROWE

Badanie przeprowadzono w Centrum Metrologii Badań i Certyfikacji firmy Radwag. Warunki klimatyczne podczas testu, temperatura $\sim 21.3^\circ$, wilgotność względna $46\% \div 48\%$. Dynamika zmian temperatury i wilgotności była zgodna z wartościami określonymi i zawartymi w normie OIML R-111-1 dla odważników klasy dokładności E1. Wszystkie pomieszczenia, w których przeprowadzono pomiary, posiadały automatyczną regulację temperatury i wilgotności z możliwością rejestracji on-line. Laboratorium, w którym wykonano pomiary, znajduje się na poziomie „-1”. Podstawa betonowej konsoli o masie ok. 3000 kg na której umieszczono komparator NANO.AK-4.500.5Y była oddzielona od fundamentu budynku. Stanowisko pracy i widok ogólny laboratorium przedstawiono na rysunku 6.



Rysunek 6. Stanowisko badawcze dla komparatorów masy / widok ogólny laboratorium

4.3. WYNIKI

Komparację dla każdego obciążenia przeprowadzono metodą ABBA w stabilnych warunkach zewnętrznych – zmienność wilgotności 1.20 %, temperatury 0.14°C w czasie 24 godzin. Wyniki jakie uzyskano w czasie badania zaprezentowano w tabeli 4.

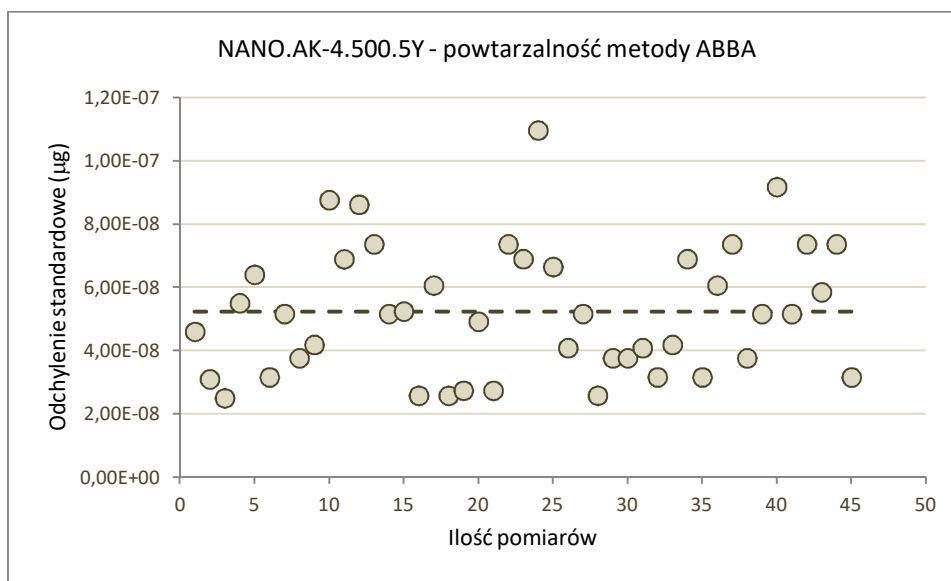


Rysunek 7. NANO.AK-4.500.5Y – proces ważenia wzorca

Tabela 4. Precyzja pomiarów masy komparatora NANO.AK-4.500.5Y dla różnych obciążeń testowych.

Masa nominalna wzorca	Odchylenie standardowe S \bar{x} (5)	Precyzja wyznaczenia wartości średniej \bar{x}
500	0.06 μg	$\pm 0.02 \mu\text{g}$
200	0.06 μg	$\pm 0.02 \mu\text{g}$
100	0.04 μg	$\pm 0.03 \mu\text{g}$
50	0.04 μg	$\pm 0.01 \mu\text{g}$
20	0.07 μg	$\pm 0.03 \mu\text{g}$
10	0.04 μg	$\pm 0.01 \mu\text{g}$
5	0.06 μg	$\pm 0.02 \mu\text{g}$
2	0.05 μg	$\pm 0.02 \mu\text{g}$
1	0.05 μg	$\pm 0.01 \mu\text{g}$

Komparator NANO-AK-4.500.5Y jest komparatorem z tzw. pełnym zakresem równoważenia czyli oferuje pomiar masy wzorca w zakresie 0 ÷ 500 mg. Praktyka metrologiczna pokazuje że dokładność pomiaru obiektów o tzw. małych masach jest determinowana tylko przez precyzję (odchylenie standardowe). W przypadku NANO-AK-4.500.5Y stwierdzono że precyzja w serii pomiarów jest stała z niewielką zmiennością która prawdopodobnie wynika z czynników środowiskowych i częściowo z dryftów komparatora masy. Rozrzut wyników odchylenia standardowego wszystkich serii metody ABBA zaprezentowano na rysunku 8.



Rysunek 8. Rozrzut wyników odchylenia standardowego wszystkich serii metody ABBA

Dodatkowo dla wzorca o masie 1 mg przeprowadzono 10 powtórzeń metody 6xABBA celem porównania precyzji pomiaru masy jaka oferuje komparator NANO.AK-4.500.5Y z inną metodą w której zastosowano komparator automatyczny UMA-5 z działką elementarną $d=0.1\mu\text{g}$. Podstawowe parametry metrologiczne wykorzystanych komparatorów masy pokazano w tabeli 5.

Tabela 5. Podstawowe parametry metrologiczne komparatorów masy UMA / NANO

	UMA 5.5Y	NANO.AK-4.500.5Y
Klasa dokładności E1	1 mg ÷ 5 g	0.05 mg ÷ 500 mg
Klasa dokładności E2	1 mg ÷ 5 g	0.05 mg ÷ 500 mg
Klasa dokładności F1	1 mg ÷ 5 g	0.05 mg ÷ 500 mg
Klasa dokładności F2	1 mg ÷ 5 g	0.05 mg ÷ 500 mg
Obciążenie maksymalne (Max)	6.1 g	510 mg
Działka elementarna (d)	0.1 µg	0.01 µg
Powtarzalność standardowa (5% Max)	0.2 µg	0.04 µg
Powtarzalność standardowa (Max)	0.4 µg	0.06 µg
Adiustacja	wewnętrzna	zewnętrzna
Zakres równoważenia	0 g ÷ 6.1 g	0 g ÷ 510 mg
Magazyn odważników / wzorców	36 szt.	4 szt.

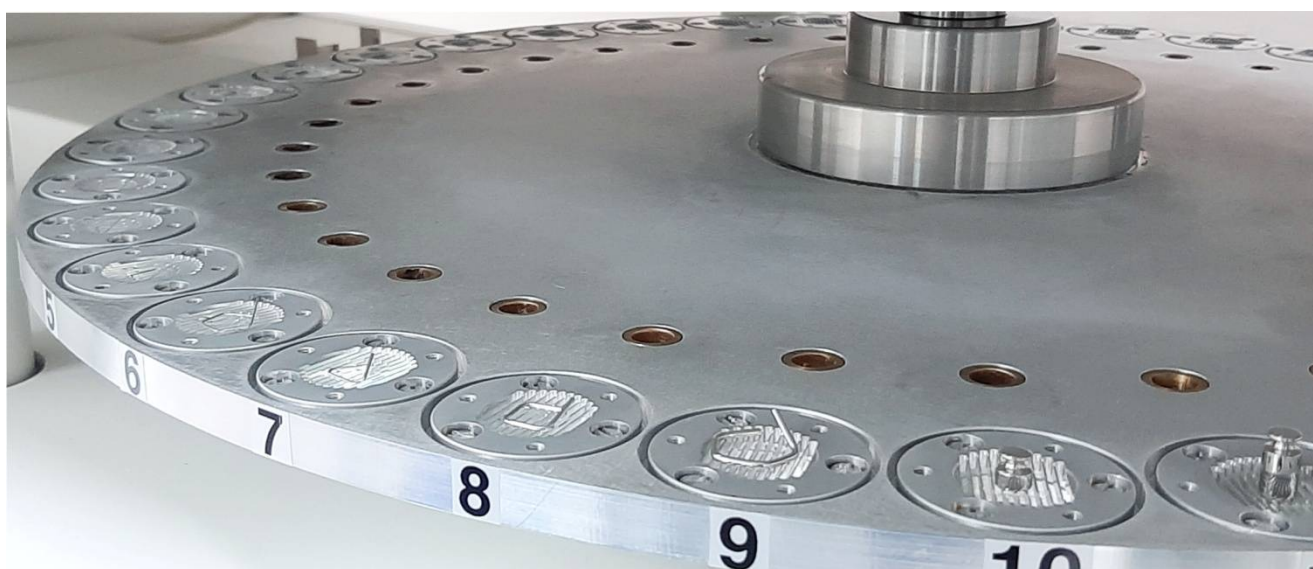
Wyniki z porównania precyzji pomiarów dla metody ABBA przedstawiono w tabeli 6,7.

Tabela 6. Wyniki komparatora masy NANO.AK-4.500.5Y, $d=0.01 \mu\text{g}$, cewka S10.

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{S}
S (μg)	0.046	0.031	0.025	0.055	0.064	0.044	0.039	0.058	0.045	0.056	0.046

Tabela 7. Wyniki komparatora masy UMA-5, $d=0.1 \mu\text{g}$, cewka S20

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	\bar{S}
S (μg)	0.124	0.098	0.163	0.181	0.013	0.189	0.128	0.144	0.176	0.190	0.141



Rysunek 9. Widok magazynu komparatora UMA 5.5Y z wzorcami masy

Odchylenie standardowe będące miarą precyzji w serii pomiarów jest około 4-krotnie mniejsze gdy zastosowano komparator NANO.AK-4.500.5Y. Badanie precyzji dla obydwu komparatorów masy wykonano w tym samym czasie, w tych samych warunkach w cyklu automatycznym. Stąd też można wnioskować że jedynym istotnym czynnikiem mającym wpływ na wynik porównania była różna konstrukcja mechaniczna komparatora NANO.AK-4.500.5Y (innowacyjność technologiczna).

Walory eksploatacyjne NANO.AK-4.500.5Y można znacznie zwiększyć poprzez zastosowanie magazynu dla większej ilości odważników. Konsekwencją tego będzie nieco większa konstrukcja mechaniczna urządzenia ale układ pomiaru masy zachowa swoje właściwości metrologiczne.

5. WNIOSKI

Proces komparacji polegający na określeniu różnicy między wzorcem a obiektem badanym wymaga bardzo dobrej stabilności układu wagowego. Taki stan jest możliwy do uzyskania w przypadku komparatora NANO.AK-4.500.5Y, głównie w efekcie jego optymalizacji konstrukcyjnej. Dzięki temu masa odważnika badanego może być wyznaczona z mniejszą niepewnością, co może być istotne dla rozwoju technik pomiarowych stosowanych w metrologii prawnej i naukowej.

Z drugiej strony należy zauważyć że komparacja jest procesem uniwersalnym i ma zastosowanie także w innych obszarach takich jak motoryzacja. W tym przypadku badanie polega na określeniu ilości emitowanych cząstek stałych z silników spalinowych poprzez pomiar różnicowy masy filtra. Jak wiadomo normy emisji spalin stają się coraz bardziej rygorystyczne, więc ilość emitowanych cząstek stałych jest mniejsza. To z kolei wymusza zastosowanie coraz dokładniejszych urządzeń pomiarowych, najlepiej takich które pracują w trybie automatycznym (wyeliminowanie czynnika ludzkiego).

Spis rysunków

Rysunek 1. Rozdzielczość ultra-mikrowagi UYA 2.5Y w obszarze metrologii prawnej.....	3
Rysunek 2. NANO.AK-4.500.5Y – czynniki wpływające na proces pomiaru masy	4
Rysunek 3. Szkic komparatora NANO.AK-4.500.5Y i.....	5
Rysunek 4. Rejestracja i wizualizacja parametrów środowiskowych podczas komparacji (22.04.2023)	7
Rysunek 5. Budowa cewki,.....	7
Rysunek 6. Stanowisko badawcze dla komparatorów masy / widok ogólny laboratorium	10
Rysunek 7. NANO.AK-4.500.5Y – proces ważenia wzorca	11
Rysunek 8. Rozrzut wyników odchylenia standardowego wszystkich serii metody ABBA.....	12
Rysunek 9. Widok magazynu komparatora UMA 5.5Y z wzorcami masy	13

Spis tabel

Tabela 1. Maksymalne dopuszczalne błędy dla odważników ($\pm \delta m$ w mg).....	4
Tabela 2. Temperatura otoczenia podczas wzorcowania odważników (wartości rekomendowane).....	5
Tabela 3. Wyniki zmian masy dla różnych cewek zależnie od zastosowanego zabezpieczenia	8
Tabela 4. Precyzja pomiarów masy komparatora NANO.AK-4.500.5Y dla różnych obciążeń testowych.....	11
Tabela 5. Podstawowe parametry metrologiczne komparatorów masy UMA / NANO.....	12
Tabela 6. Wyniki komparatora masy NANO.AK-4.500.5Y, $d=0.01 \mu\text{g}$, cewka S10.....	13
Tabela 7. Wyniki komparatora masy UMA-5, $d=0.1 \mu\text{g}$, cewka S20	13

6. LITERATURA

1. M. Solecki, T. Szumiata. 2017. Optimization of mass standards and weights calibration (1 mg – 1 kg) using rotational automatic mass comparator. IMEKO 2017.
2. M. Solecki, T. Szumiata. 2018. Automatyzacja procesu wzorcowania wzorców masy i odważników oraz jej wpływ na poprawę parametru powtarzalności komparatorów masy. PPM Szczyrk.
3. OIML R 111-1 Edition 2004 Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3 Part 1: Metrological and technical requirements.
4. M.H. Hu, J. Wang, Y. Zhang, C.Q. Cai, R.L. Zhong, H. Yao, J.A. Ding. 2012. Research on micro-gram weights standards below 1 mg in NIM. p. 172-175. XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth.
5. D. Prażák, J. Zůda, L. Peksa. 2010. Calibration of secondary standard leaks by means of mass comparison. IMEKO TC3, TC5 and TC22 Conferences
6. M. Ueki, S. Mizushima, Jain-Xin Sun, K. Ueda. 2004. Improvement of Mass Standard up to 20 kg by Multiple Calibration Method. FILTR SEP vol.1, p 450 – 455.
7. Z. Zelenka. 2003. Uncertainty estimate of combination of verified weights. Proceedings, XVII IMEKO World Congress, p. 1319-1322.
8. S. Janas, M. Solecki, T Szumiata. 2017. Automatic comparison of weights and mass standards. Radwag Balances & Scales.



RADWAG[®]
www.radwag.com