

METROLOGIA W LABORATORIUM

SYSTEMY WAGOWE STOSOWANE W BADANIACH NAUKOWYCH ORAZ PRZEMYSŁE

Sławomir Janas¹, Piotr Cieplucha², Martyna Roszowska-Jarosz³, Kamil Stosur⁴

¹ Head of Testing Laboratory, Radwag MRCC

² Intellectual Property, EMC Certification, Radwag MRCC

³ Mass and water content measurement Laboratory, Radwag MRCC

⁴ Electromagnetic compatibility Laboratory, Radwag MRCC



Citation: Janas, S.; Cieplucha P.; Roszowska-J, M.; Stosur, K. Metrologia w Laboratorium - systemy wagowe stosowane w badaniach naukowych oraz przemysle. Radwag Metrology Research and Certification Center, 2024, 2, pp. 1-54.
<https://radwag.com>

Copyright by RADWAG Wagi Elektroniczne
Radom 2024
Wydanie II
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.com>

SPIS TREŚCI

1. Wstęp	5
2. Metrologia naukowa	6
2.1. Dyseminacja.....	15
2.2. Pomiary w skali nano	16
3. Metrologia przemysłowa	18
3.1. Adiustacja	22
4. Pomiary w skali mikro	26
5. Automatyzacja w pomiarach masy	30
6. Metrologia w badaniach naukowych	36
6.1. Stabilność masy filtrów w czasie.....	36
6.2. Podatność magnetyczna stopów metali używanych w implantach medycznych.....	43
7. Innowacyjność jako źródło postępu technicznego	47
7.1. Automatyczny komparator masy, Pat. 228368	47
7.2. Mechanizm kalibracji z odważnikiem wewnętrznym dla wagi elektronicznej - Pat. 226501.....	50
8. Certyfikacja systemów wagowych gwarancją jakości i niezawodności	52
9. Cobot w pomiarach masy	54
10. Kontrola metrologiczna wag i systemów wagowych	55

1. Wstęp

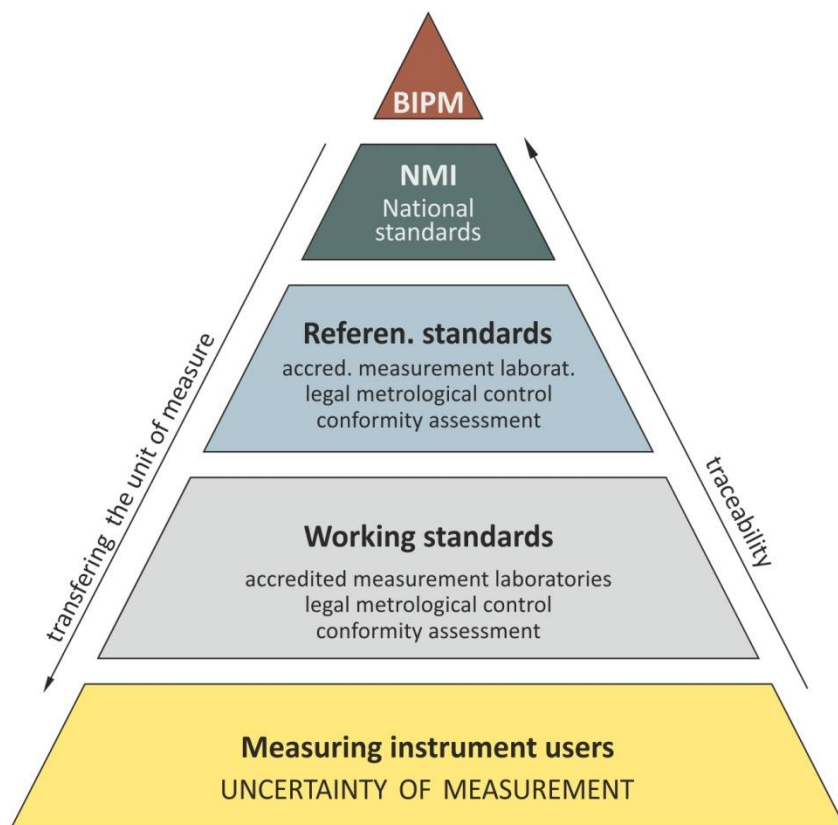
Gwałtowny rozwój nauki można było obserwować już od lat 60 ubiegłego wieku a jego głównym motorem była automatyzacja wielu procesów fizycznych i chemicznych. W tamtych czasach pomiary dokonywane w skali mili tj. 10^{-3} były wystarczające do opisu badanych zjawisk i procesów. W latach 80-tych XX wieku pomiary dokonywano już w skali mikro tj. 10^{-6} , a obecnie w skali nano tj. 10^{-9} i jeszcze dokładniej. Szacuje się że w naszym środowisku występuje ponad 65 mln związków chemicznych a ich ilość może szybko rosnać za sprawą sztucznej inteligencji która znacznie przyspiesza procesy badawcze. Niektóre z tych związków mogą być dla nas niebezpieczne gdy myślimy o toksyczności lub występowaniu ich w skali nano. Prawdopodobnie w ciągu naszego życia będziemy mieć styczność z około 100 tys. związków chemicznych, większość z nich ma pochodzenie antropogeniczne. Można stwierdzić że stosowanie metod analitycznych, które były odpowiednie do oznaczeń na poziomach mg/L nie są już odpowiednie do analiz na poziomach śladowych czy ultra-śladowych. Zmienia się definicja tych określeń, a to co kiedyś uważane było za ślady jest dziś definiowane w kategorii makro. Takie podejście wymaga zastosowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych i informatycznych dla przyrządów pomiarowych w tym także dla tych związanych z pomiarami masy. Większość zaawansowanych systemów wagowych to skomplikowane hybrydowe układy mechaniczne w których pomiar masy jest przetwarzany przez rozbudowane informatycznie – elektroniczne tory pomiarowe. Jest to zupełnie nowa jakość dostępna w profesjonalnych wagach o najwyższych rozdzielczościach jak np. seria mikrowag UYA, MYA produkcji firmy Radwag.

Można zatem zadać istotne pytanie: czy bez znajomości podstaw działania takiego układu pomiarowego oraz podstaw metrologii, grawimetrii, termo grawimetrii itd., można obsługiwać tak zaawansowane przyrządy pomiarowe?. Odpowiedź brzmi: tak, obsługiwać można, ale już rozumieć jak one działają i optymalnie wykorzystywać – niekonieczne. Należy tu zauważyć że większość współczesnych przyrządów pomiarowych w także systemy wagowe działają w sposób intuicyjny, co z jednej strony jest pożądane, ale z drugiej strony może powodować efekt tzw. „czarnej skrzynki” → znamy dane wejściowe i wynik analizy, nie wiedząc w jaki sposób go uzyskano. Czy zatem ten wynik analizy jest dokładny i może być wykorzystany dalej w procesie? Mówi się że wiara przenosi góry – niestety nie w nauce i nie w metrologii.

2. Metrologia naukowa

Metrologia jako nauka o pomiarach jest jednym z istotnych aspektów który zapewnia poprawne działanie każdej gospodarki. Takie obszary jak handel, podatki, cła, rozliczenia, naliczanie opłat i kar, są pod kontrolą urzędów państwowych które okresowo sprawują nadzór nad wszystkimi przyrządami pomiarowymi, które są wykorzystywane do tych czynności. Takie rozwiązanie zabezpiecza odbiorców tych usług przed fałszerstwem poprzez dość jasno określone wymagania co do tego jak mają działać i w jakich tolerancjach urządzenia pomiarowe. Dotyczy to także pomiarów masy które są dość powszechne w bezpośrednim obrocie handlowym, ale są także nieodłączną częścią wielu testów wykonywanych w przemyśle farmaceutycznym czy też laboratoriach badawczo-rozwojowych.

Historycznie rozwój każdej cywilizacji od tych najstarszych po dzień dzisiejszy był i jest ściśle zależny od pomiarów. Należy zauważyć że dynamika zmian i wymagań ilościowych i jakościowych jaka zachodzi we współczesnym świecie wymaga elastycznego podejścia także w obszarze metrologii naukowej. Ten obszar nauki zajmuje się rozwojem i nadzorem nad jednostkami miary określając nowe wymagania dla wyposażenia pomiarowego, także w obszarze pomiarów masy. Najlepszym tego przykładem jest redefinicja wzorca masy 1kg w postaci wagi prądowej Watta, jako najwyższy stopień w łańcuchu przekazywania jednostki miary.



Rysunek 1. Łańcuch spójności pomiarowej

Jednym z bardziej zaawansowanych rozwiązań w zakresie pomiarów masy z których korzysta metrologia naukowa są komparatory masy. W ogólnym ujęciu komparacja jest procesem porównywania między sobą dwóch wzorców, referencyjnego oraz badanego celem wyznaczenia masy wzorca badanego. W tym procesie wykorzystuje się komparatory o różnej konstrukcji i zakresie ważenia, ale najczęściej zastosowanie mają komparatory masy z tzw. ograniczonym zakresem równoważenia. Posiadają one konstrukcję w której masa wzorca stanowi tzw. obciążenie wstępne komparatora tak jak np. w komparatorach serii AKM.



Rysunek 2. Komparator AKM 2.20.5Y, d= 0,1 mg

Obciążenie maksymalne 20,5 kg, zakres równoważenia elektrycznego - 500g do + 500 g
Odważniki balastowe wewnętrzne, sterowanie półautomatyczne,
Zakres komparacji od 1 kg – 20 kg (zależnie od klasy dokładności)

Komparatory masy umożliwiają badanie zarówno pojedynczych wzorców masy jak ich zdefiniowanych zestawów w cyklu ręcznym lub automatycznym, przy stałym ciśnieniu lub w próżni. Najbardziej zaawansowanym rozwiązaniem jest komparator AVK 1000.5Y, stosowany do porównywania wzorców o masie 1kg z rozdzielczością 10 miliardów dziesiątek (10^{-9} g), co jak się wydaje jest górnym limitem dla różnicowych pomiarów masy. Jest to urządzenie dedykowane dla narodowych jednostek notyfikowanych które dzięki technologicznym rozwiązaniom zastosowanym w tym komparatorze mogą przekazywać jednostkę miary przy zachowaniu małej niepewności pomiarowej. Cykl badawczy może być realizowany w próżni lub przy stałym ciśnieniu. Główne parametry metrologiczne komparatora AVK-1000.5Y pokazano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry metrologiczne komparatora AVK-1000.5Y

Klasa dokładności odważników E1 ÷ F2	0,1 kg ÷ 1 kg
Obciążenie maksymalne	1002g
Działka elementarna	0,1μg
Powtarzalność standardowa	0,5μg
Powtarzalność dopuszczalna	1μg
Zakres równoważenia elektrycznego	-1 g ÷ +2 g
Czas stabilizacji	60s
Magazyn odważników / wzorców	6
Ciśnienie w komorze próżniowej	10 ⁽⁻⁶⁾ mbar
Wymiary obiektów do komparacji	cyldryczne ø (22-95)x110; kuliste ø (40-100) mm

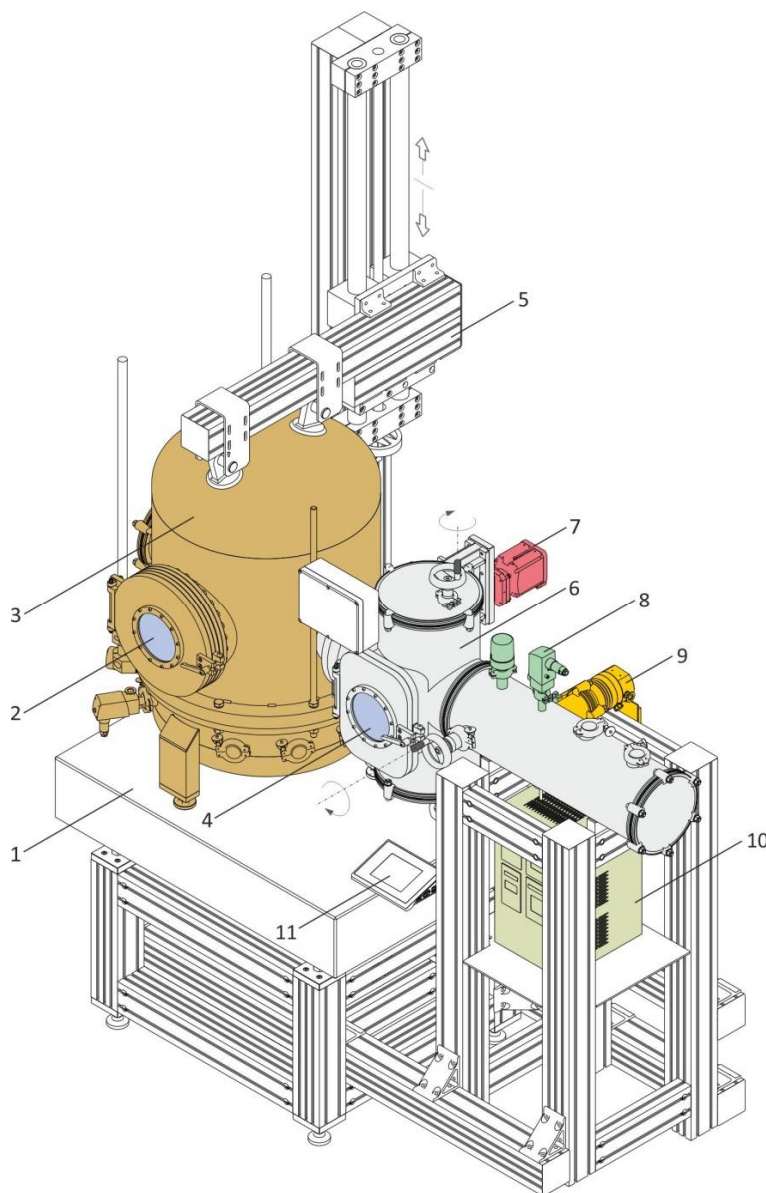
Należy wyraźnie stwierdzić że jakość procesu komparacji jest zależna nie tylko od rozdzielczości komparatora ale także od warunków w jakich wykonywane są pomiary. W wielu przypadkach komparacja jest całkowicie zautomatyzowana więc tzw. czynnik ludzki nie ma wpływu na wynik analizy. Niestety dla uzyskania akceptowanych wyników wymagana jest stabilność środowiska pracy w zakresie $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ /24 godziny, co jest dość trudne do uzyskania nawet w laboratoriach jednostek notyfikowanych. Wizerunek komparatora AVK przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Komparator próżniowy AVK 1000.5Y

Obciążenie maksymalne 1000 g, zakres równoważenia elektrycznego - 1g do + 2 g
Odważniki balastowe wewnętrzne, sterowanie automatyczne,

Komparator AVK-1000.5Y jest komparatorem z tzw. ograniczonym zakresem równoważenia elektrycznego, co oznacza że jego szalka jest zawsze obciążona masą wzorca referencyjnego lub badanego. Proces komparacji polega zatem na obserwacji rozbieżności wyników ważenia wzorców względem położenia zerowego komparatora. AVK posiada możliwość badania max 6 wzorców metodą ABA lub ABBA według tzw. programowalnych planów komparacji, które definiują ilość powtórzeń, miejsce wzorców w magazynie, ich klasę dokładności itd. Sterowanie cyklem komparacji odbywa się zdalnie /Ethernet/ lub wykorzystując panel operatora (11). Konstrukcję komparatora AVK-1000.5Y przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4. Konstrukcja komparatora próżniowego AVK-1000

Legenda: 1 – stół wagowy, 2 – okno wizyjne komparatora, 3 – komparator, 4 – okno wizyjne Load Lock, 5 – winda serwisowa, 6 – Load Lock, 7 – zawór odcinający, 8 – czujniki, 9 – pompa molekularna, 10 – układ sterowania, 11 – panel operatora

Nie jest tajemnicą że tzw. „good handlig” rozumiany jako dobra praktyka ważenia ma ograniczenia związane z generowaniem uderów podczas umieszczania wzorca na szalce komparatora masy. Z tego powodu tam gdzie istnieje konieczność osiągnięcia bardzo „dokładnych” pomiarów wprowadza się automatyzację procesu pomiarowego → komparatory automatyczne, robotyczne. Radwag takie rozwiązania oferuje nie tylko dla laboratoriów związanych z pomiarami masy, ale także dla obszarów zajmujących się ochroną środowiska gdzie istotna jest wydajność procesu ważenia oraz precyzyjne odmierzenie bardzo małych ilości np. pyłu PM 2.5, PM10, ilości emitowanych cząstek stałych PM (motoryzacja).



Rysunek 5. Manualny komparator masy serii WAY

Obciążenie maksymalne 500 g, zakres równoważenia elektrycznego - 10g do + 20 g
Odważniki balastowe wewnętrzne, sterowanie automatyczne

Wyniki z komparacji są wykorzystywane dla określenia klasy odważników, wzorców masy oraz ich masy rzeczywistej przy zachowaniu jak najmniejszej wartości niepewności pomiarowej. Normatywne wartości błędów granicznych dla odważników zawiera dokument OIML R111-1 „Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements. Skrócony wykaz pokazuje także tabela 2.

Tabela 2. Maksymalne dopuszczalne błędy dla odważników ($\pm \delta m$ w mg)

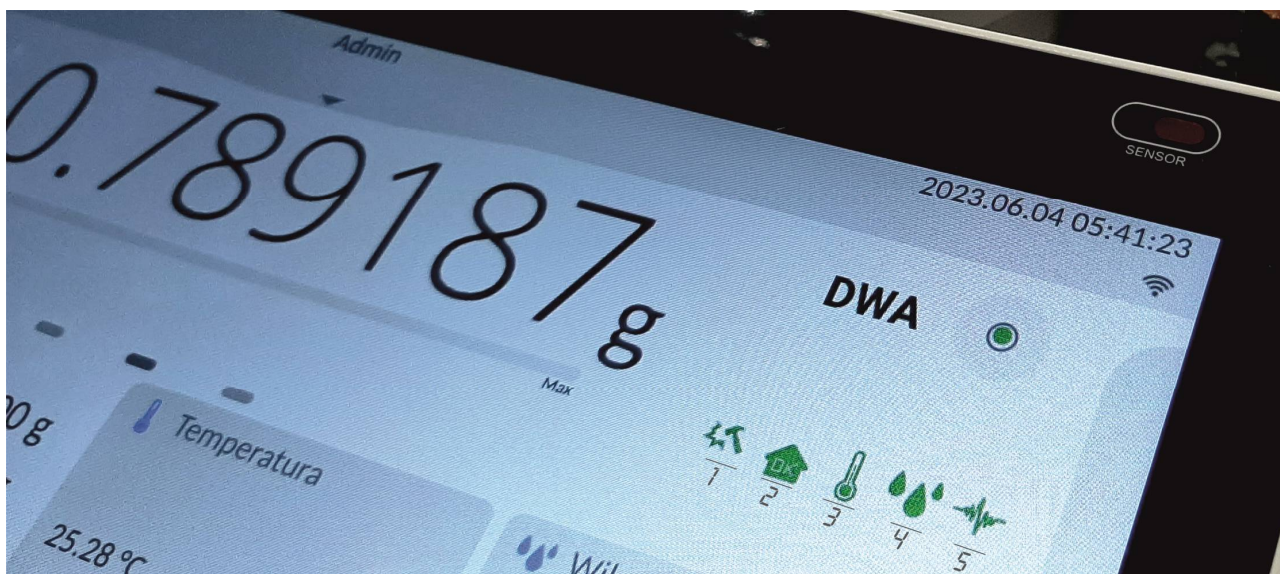
Masa nominalna (mg)	Klasa dokładności / maksymalny błąd dopuszczalny (\pm mg)			
	E1	E2	F1	F2
1000	0,01	0,03	0,1	0,30
500	0,008	0,025	0,08	0,25
200	0,006	0,02	0,06	0,20
100	0,005	0,016	0,05	0,16
50	0,004	0,012	0,04	0,12
20	0,003	0,01	0,03	0,10
10	0,003	0,008	0,025	0,08
5	0,003	0,006	0,020	0,06
2	0,003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

Jak wspomniano wcześniej istotne znaczenie dla dokładności komparacji mają warunki, w jakich ten proces jest wykonywany. Zalecenia w tym zakresie podaje OIML R111-1, oraz tabela 3. Jednakże dopiero kwalifikacja operacyjna, czyli testy w rzeczywistych warunkach dają realny pogląd na to, w jakim stopniu wynik komparacji jest zależny od zmienności temperatury oraz wilgotności w miejscu pracy.

Tabela 3. Temperatura otoczenia podczas wzorcowania odważników

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

Przygotowując się do testów należy pamiętać o tym, że istotnym czynnikiem zakłócającym pomiar masy są drgania podłoża. To zakłócenie może mieć bardzo złożony charakter, od drgań mechanicznych po swobodne ruchy skorupy ziemskiej w efekcie naturalnych zjawisk fizycznych lub trzęsień Ziemi. Mając to na uwadze wagi i komparatory masy produkcji firmy Radwag zostały wyposażone w czujniki umożliwiające detekcję tych zjawisk co jest jednym z aspektów aplikacji Digital Weighing Auditor (DWA).



Rysunek 6. Aplikacja Digital Weighing Auditor

Legenda: 1 – monitoring jakości ważenia (udary), 2 – status Digital Weighing Auditor, 3 – kontrola temperatury, 4 – kontrola wilgotności, 5 – detekcja drgań podłoża.

Komparacja poza dokładnością powinna cechować się także wydajnością, zwłaszcza gdy ma ona zastosowanie komercyjne – „czas to pieniąż”. Takie cechy zapewnia komparator masy RMC 1000.5Y, w którym zastosowano dodatkową osłonę przeciwpodmuchową oraz układ szalki podwieszanej. To rozwiązanie zawsze zapewnia idealnie centryczną pozycję wzorca względem układu wagowego eliminując definitywnie wpływ ruchu powietrza na wynik pomiaru masy (rys. 7).



Rysunek 7. Komparator masy RMC 1000.5Y

Legenda: 1 – osłona zewnętrzna komparatora, 2 – wzorce masy, 3 – magazyn liniowy wzorców masy, 4 – układ robotyczny do sterowania pracą komparatora, 5 – układ wagowy komparatora (pomiar masy)
7 – pulpit operatora.

Możliwość komparacji wzorców o różnych masach zapewniają wewnętrzne dociążenia balastowe, których masa jest automatycznie dobierana względem masy wzorca badanego. Parametry komparatora RMC 1000.5Y pokazano w tabeli 4.

Tabela 4. Parametry metrologiczne komparatora RMC 1000.5Y

Zakres komparacji - odważniki klasy E1, E2, F1, F2	10g ÷ 1kg
Obciążenie maksymalne Max	1020g
Działka elementarna (d)	1μg
Powtarzalność standardowa dla 5% Max *)	1.2μg
Powtarzalność standardowa dla Max *)	2μg
Zakres równoważenia elektrycznego	-1 g ÷ +20 g
Adiustacja	wewnętrzna
Wilgotność względna	40% ÷ 60%
Magazyn odważników / wzorców masy	36 szt.

*) Powtarzalność jest wyrażona odchyleniem standardowym wyznaczonym dla 6 cykli ABBA

Sterowanie pracą komparatora RMC 1000.5Y może się odbywać zdalnie wykorzystując aplikację komputerową RMCS, która zarządza całym procesem od momentu przyjęcia zlecenia poprzez komparację aż do wydania świadectwa wzorcowania. Wyposażeniem opcjonalnym komparatora jest kamera sprzężona z indywidualnym środowiskiem klienta (nadzór nad pracą układu robotycznego).

W ramach badań własnych oceniono precyzję pomiarów masy komparatora RMC 1000.5Y w całym zakresie pomiarowym tj. od 10g do 1kg. Badania przeprowadzono w Centrum Metrologii Badań i Certyfikacji firmy Radwag. Wzorcem odniesienia w metodzie ABBA dla każdego obciążenia był odważnik klasy dokładności E₁ a obiektem badanym odważnik klasy dokładności F₁ wg. OIML R111-1.

Dla każdego obciążenia wyznaczono odchylenie standardowe z 6 serii ważeń metody ABBA, którą następnie powtórzono 8 krotnie celem określenia stabilności komparatora w długim okresie czasu. 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

Tabela 5. Precyzja pomiaru komparatora RMC 1000.5Y

odchylenie standardowe z 6 serii metody ABBA						
\bar{x} (μg)						
10 g	20 g	50g	100 g	200 g	500 g	1000 g
0.96 ± 0.29	1.00 ± 0.19	1.01 ± 0.18	1.18 ± 0.37	1.20 ± 0.24	1.35 ± 0.29	1.43 ± 0.36

Na podstawie wyników z przeprowadzonych badań można stwierdzić że precyzja pomiarów w cyklu komparacji ABBA zawiera się w granicach 0.96 ÷ 1.43 μg. Najlepszą precyzję pomiarów uzyskuje się dla wzorców o masach do 50 g, około 1 mikrograma. Zwiększenie masy odważnika w komparacji to z fizycznego punktu widzenia większe wymagania dla pracy układu mechanicznego, co finalnie daje nieco gorszą precyzję pomiarów, tak jak dla odważnika o masie 1 kg.

2.1. Dyseminacja

Tradycyjna ręczna metoda wyznaczania masy odważnika / wzorca poprzez bezpośrednie porównania zazwyczaj wymaga dość dużej ilości powtórzeń. Taki sposób określania masy odważnika jest podatny na błędy pochodzące od tzw. wartości odstających, które trudno poprawnie zdiagnozować. Konsekwencją tego może być zbyt duża niepewność wyznaczenia masy obiektu badanego. Automatyzacja i robotyzacja pomiarów masy znacznie zmieniła ten stan rzeczy gdyż ilość pomiarów nie już taka istotna.

Drugi problem to niepewność wyznaczenia masy odważnika i dotyczy on głównie odważników klasy dokładności E_1 o masie mniejszej niż 1g. Tu znaczny wpływ pochodzi od niepewności wyznaczenia masy odważników referencyjnych, ale nie należy zapominać także o wpływie czynników zewnętrznych, zwłaszcza gdy powierzchnia odważnika jest duża. Mając na uwadze te ograniczenia coraz częściej podczas badań wykorzystywana jest metoda podziału tzw. dyseminacja. W ogólnym ujęciu to proces porównywania zestawu odważników względem jednego lub więcej odważników referencyjnych. Metoda desyminacji wymaga przeprowadzenia kilku lub kilkunastu ważeń z różnymi kombinacjami odważników o równej całkowitej masie nominalnej z zastosowaniem obliczeń adiustacyjnych w celu ograniczenia propagacji błędów. Przy zastosowaniu robotyzacji np. komparator robotyczny RMC 1000.5Y nie stanowi to większego problemu, gdyż wszystkie obliczenia realizuje oprogramowanie RMCS współpracujące z układem robotycznym.



Rysunek 8. RMC 1000.5Y - odważniki w procesie dyseminacji

Obciążenie maksymalne 1000 g, zakres równoważenia elektrycznego - 10g do + 20 g
Możliwość komparacji wzorców masy 10 g ÷ 1kg klasy E0 –F2,
Odważniki balastowe wewnętrzne, sterowanie automatyczne

2.2. Pomiary w skali nano

Odmierzanie coraz to mniejszych ilości w skali mikro oraz nano wymaga nie tylko super dokładnych urządzeń pomiarowych ale także odpowiednich 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, których działka elementarna wynosi 0.1 μg podczas produkcji takich wzorców może być niewystarczające, głównie ze względu na niepewność wyznaczenia masy wzorca. Mając to na uwadze rozpoczęto prace badawcze w firmie Radwag, których efektem jest pierwszy nano-komparator masy o nazwie NANO.AK-4.500.5Y z działką elementarną $d=0.01\mu\text{g}$ (10 nanogramów).



Rysunek 9. NANO-Komparator AK/4-500.5Y

Obciążenie maksymalne 500 mg, 4 pozycje dla wzorców, sterowanie automatyczne
Adiustacja zewnętrzna, działka elementarna 0,00001 mg,

Należy zauważyć że metrologia prawna w odniesieniu do odważników jednoznacznie podaje wartości maksymalnych dopuszczalnych błędów oraz maksymalną rozszerzoną niepewność wyznaczenia masy każdego z nich (pkt. 5.2 OIML R 111-1). W przypadku odważników o masach w zakresie 20 mg ÷ 1 mg maksymalny dopuszczalny błąd podczas określenia ich masy wynosi ± 0.003 mg przy niepewności rozszerzonej 0.001 mg (tabela 7). Podczas kontroli 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. Jest to istotny problem, zwłaszcza gdy zaczynamy poszukiwać metod produkcji i kontroli dla odważników o masach mniejszych niż 1mg.

Tabela 6. OIML R111-1, 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

Poprawność działania komparatora NANO.AK-4.500.5Y sprawdzono podczas badań w Centrum Metrologii Badań i Certyfikacji firmy Radwag. Przeprowadzono komparację dla każdego obciążenia 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 7.

Tabela 7. 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 (mg)	0.06 μ g	\pm 0.02 μ g
200	0.06 μ g	\pm 0.02 μ g
100	0.04 μ g	\pm 0.03 μ g
50	0.04 μ g	\pm 0.01 μ g
20	0.07 μ g	\pm 0.03 μ g
10	0.04 μ g	\pm 0.01 μ g
5	0.06 μ g	\pm 0.02 μ g
2	0.05 μ g	\pm 0.02 μ g
1	0.05 μ g	\pm 0.01 μ g

Praktyka pokazuje że dokładność pomiaru masy obiektów o tzw. małych masach jest determinowana tylko przez precyzję pomiaru. W przypadku NANO-AK-4.500.5Y stwierdzono że precyzja w serii pomiarów jest stała z niewielką zmiennością wynoszącą 0.02 μ g , niezależnie od masy badanego odważnika.

3. Metrologia przemysłowa

Może nie zdajemy sobie sprawy że większość otaczających nas przedmiotów czy odbywających się procesów była lub jest ściśle związana z metrologią. Pomiary są wykorzystywane do określania masy produktów paczkowanych jednostkowo, odmierzamy ilość tankowanego paliwa, mierzymy odległość, prędkość pojazdów, ilość substancji w mieszaninie, masę nabywanych produktów itd. To wszystko odbywa się niemal intuicyjnie za pomocą przyrządów pomiarowych, w tym także tych mierzących ilość, objętość lub masę. Trzeba zauważyć że niektóre obszary przemysłu takie jak np. handel, ochrona zdrowia podlegają przepisom metrologii prawnej, co ma zabezpieczyć odbiorców tych usług przed potencjalnym fałszerstwem. O ile metrologia prawna koncentruje się na jakości przyrządów pomiarowych, to zadaniem metrologii przemysłowej jest uzyskanie akceptowanej jakości produktu lub procesu. Można to osiągać poprzez ciągłą obserwację istotnych wskaźników jakościowych, pomiary masy serii produkcyjnej → tzw. automatyczne wagi kontrolne, poprzez kontrolę masy produktu finalnego → wagi w Dziale KJ itp.



Rysunek 10. Waga PS 1000.R2 – pomiar masy farb i lakierów

Obciążenie maksymalne 1000g, działka elementarna $d=0.001g$
adiustacja automatyczna, certyfikat OIML

Niezależnie od przyjętego wariantu, najlepszym rozwiązaniem jest koncepcja QbD (Quality by Design), w której jakość jest wbudowana w produkt.

W pomiarach masy to podejście polega na określeniu takich limitów zmienności masy, przy których ciągle gwarantowana jest jakość i stabilność produktu przy zachowaniu poprawnych zależności ekonomicznych regulowanych przez konkurencję i rynek. Jest to trudne, gdyż rzeczywista dokładność pomiaru masy może być ustalona tylko podczas kwalifikacji operacyjnej w miejscu pracy, a kompleksowe ujęcie wymaga poprawnego powiązania ze sobą wielu czynników. Powstaje zatem pytanie – jakie są kryteria doboru systemu wagowego?. Wiemy że oczekiwana jest dokładność pomiaru, ale ...

Dokładność (analizy, pomiaru) jest pojęciem jakościowym¹, więc nie może być wyrażana liczbowo. Dokładność pomiaru określają dwa parametry, poprawność → błąd systematyczny oraz precyzja → błąd losowy. Poprawność pomiaru to zbieżność zachodząca pomiędzy średnią z nieskończonej liczby powtórzonych wartości wielkości zmierzonych, a wartością **wielkości odniesienia**. Test ten może być wykonany tylko z wykorzystaniem certyfikowanych wzorców masy, tak jak to jest wykonywane w dziale KJ firmy Radwag (rys. 11).

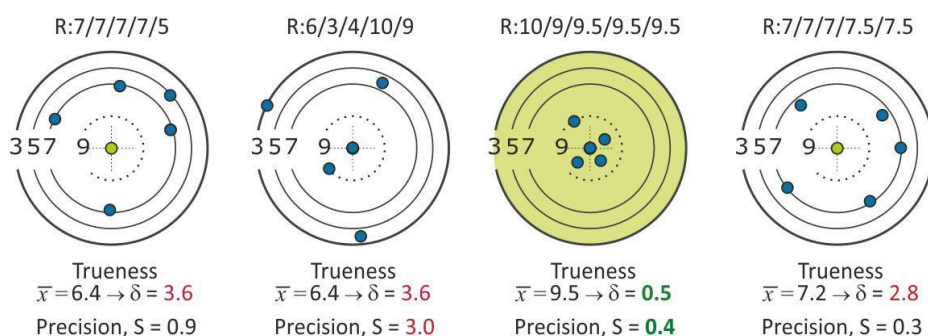


Rysunek 11. Dział Kontroli Jakości – waga AS 220.R2, ocena poprawności wskazań
AS 220.R2, Obciążenie maksymalne 220g, działka elementarna d=0.1mg
adiustacja automatyczna, certyfikat OIML

Precyzja pomiaru to zbieżność, zachodząca pomiędzy wskazaniami lub wartościami wielkości zmierzonych, otrzymanych przy powtarzalności pomiarów na tym samym lub podobnych obiektach w określonych warunkach. Dużą precyzję otrzymujemy wówczas, gdy wartości zmierzone są położone blisko siebie. Ten parametr jest mocno zależny od warunków w jakich wykonywany jest test (temperatura, wilgotność, ruch powietrza, drgania) oraz od umiejętności poprawnego ważenia.

Pomiar zatem będzie dokładny tylko wtedy gdy wartość błędu systematycznego i losowego będzie w akceptowalnych granicach (rys. 12). Jest to podejście kompleksowe stosowane gdy masa ważonego obiektu jest większa niż 25% maksymalnego obciążenia.

¹ PN-ISO 5725-1. Dokładność (poprawność i precyzja) metod pomiarowych i wyników pomiarów. Ogólne zasady i definicje



Rysunek 12. Poprawność (trueness) i precyzja (precision) w pomiarach masy

Podczas ważenia próbek o małych masach np. odmierzanie ilości proszku, masowa ocena emisji pyłu zawieszonego, istotne znaczenia dla dokładności pomiaru ma tylko błąd losowy. Taka ocena jakości pomiaru masy jest przedstawiona także w dokumentach farmakopei amerykańskiej USP–NF (United States Pharmacopeia National Formulary, Rozdział 41) oraz w Farmakopei Europejskiej (Ph. Eur. Dodatek 10.7, Rozdział 2.1.7). Celem wyznaczenia wartości dla błędu losowego należy wykonać serię co najmniej 10 pomiarów, a następnie wyliczyć wartość odchylenia standardowego z otrzymanych wyników. Wartość odchylenia standardowego jest w kolejnym kroku wykorzystana do obliczenia początku zakresu ważenia → tzw. MSW (Minimum Sample Weight).



Rysunek 13. Badanie zmian masy filtra po procesie sączenia (oczyszczalnia ścieków), odmierzanie ilości substancji (farmacja)

Mikrowaga MYA 5.5Y.FA – pomiar masy filtra, Obciążenie maksymalne 5g, działka elementarna d=0.001mg
 Waga analityczna XA 82/220.5Y, Obciążenie maksymalne 220g, działka elementarna d=0.01mg

Według USP / Ph.Eur. dokładność ważenia tzw. „małych mas” jest zapewniona gdy spełniony jest warunek (4). Podczas testu wykorzystuje się obciążenie nie większe niż 5% obciążenia maksymalnego wagi, ale może to być wzorec o masie zbliżonej do masy ważonych próbek.

Praktyka pokazuje że precyzja pomiaru dla tzw. „małych mas” ma wartość stałą, przy założeniu że warunki podczas wykonywania testu są stabilne.

$$R = \frac{2 \cdot S}{m} \leq 0.10\% \rightarrow \frac{2 \cdot S}{m} \leq 0.001 \quad (4)$$

gdzie: S – odchylenie standardowe wskazanych wartości (np. w gramach);
m – najmniejsza masa netto próbki, która będzie ważona na wadze.

Początek zakresu ważenia tzw. MSW wyznacza się z zależności (5), gdy spełnione jest wymaganie opisane zależnością (4).

$$MSW = 2000 \cdot S \quad (5)$$

Najmniejsze możliwe odchylenie standardowe z serii pomiarów wynosi 0.41d, tak więc najmniejsza wartość MSW zależnie od działki elementarnej wagi (d) może mieć wartość podaną w tabeli 8.

Tabela 8. Minimalne wartości MSW zależnie od wartości działki elementarnej wagi

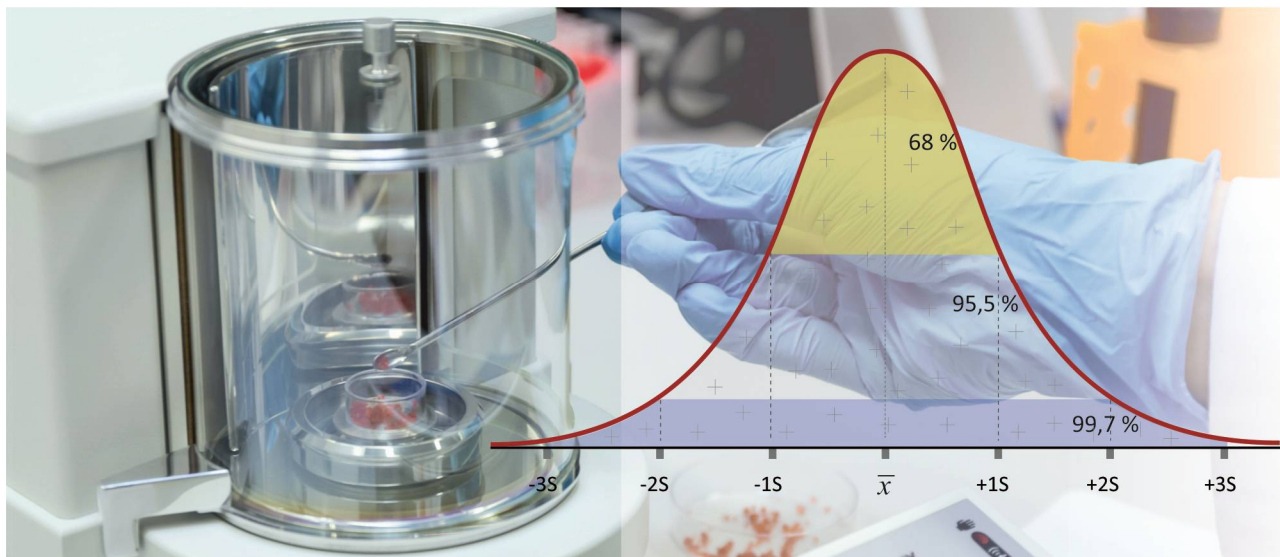
Działka elementarna (d)	Formuła	MSW	Typ wagi
1 mg	$0.41 \cdot 1\text{mg} \cdot 2000$	820 mg	PS 1000.X2
0.1 mg	$0.41 \cdot 0.1\text{mg} \cdot 2000$	82 mg	AS 220.5Y
0.01 mg	$0.41 \cdot 0.01\text{mg} \cdot 2000$	8.2 mg	XA 82/220.5Y
0.001 mg	$0.41 \cdot 0.001\text{mg} \cdot 2000$	0.82 mg	MYA 5.5Y
0.0001 mg	$0.41 \cdot 0.0001\text{mg} \cdot 2000$	0.082 mg	UYA 2.5Y



Rysunek 14. Mikrowaga MYA 5.5Y z aktywną Funkcją MSW
MYA 5.5Y, Obciążenie maksymalne 5g, działka elementarna d=0.001mg
Adiustacja wewnętrzna, certyfikat OIML

W metrologii przemysłowej wartość odchylenia standardowego (S) może być wykorzystywana do określenia przedziału w którym z pewnym prawdopodobieństwem znajduje się wynik pomiaru → nie ma pomiarów idealnych. Zastosowanie ma tu tzw. reguła 3 sigm, według której wynik pomiaru znajduje się w obszarze:

- $\pm 1S$ z prawdopodobieństwem 68 %
- $\pm 2S$ z prawdopodobieństwem 95,5 %
- $\pm 3S$ z prawdopodobieństwem 99,7 %



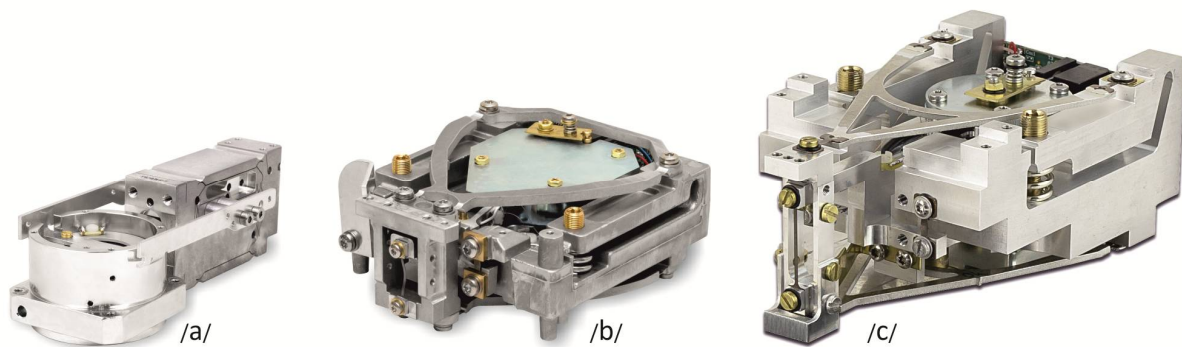
Rysunek 15. Mikrowaga MYA 2.4Y – odważanie porcji proszku

MYA 2.4Y, Obciążenie maksymalne 2g, działka elementarna $d=0.001\text{mg}$
Adiustacja wewnętrzna, certyfikat OIML

Podczas szacowania niepewności pomiaru, wartość odchylenia standardowego z serii pomiarów to tzw. niepewność pomiaru typu A, która jest wykorzystywana do szacowania niepewności rozszerzonej.

3.1. Adiustacja

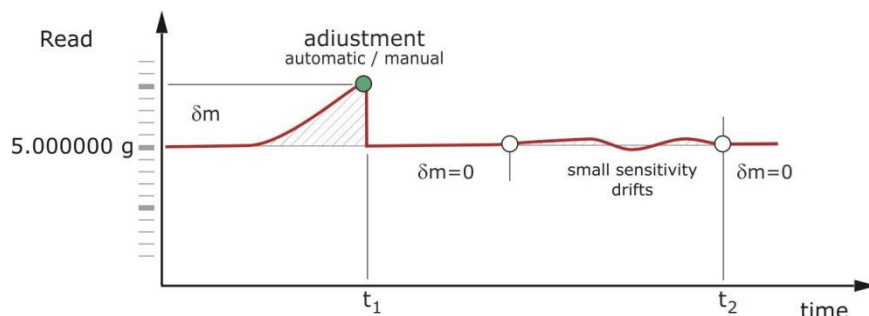
Pomiar masy w przemyśle musi być szybki i pewny, zwłaszcza gdy wynik mierzenia jest wykorzystywany jako istotna informacja w procesie sterowania produkcją. Oczekuje się zatem, że systemy wagowe będą zawsze pracować dokładnie, niezależnie od zmienności warunków zewnętrznych. Takie założenie jest prawdziwe dla wag których działka elementarna / odczytowa ma dość dużą wartość → $d \geq 1\text{g}$. Można wówczas mówić o tzw. pomiarach technicznych, które są wykonywane zazwyczaj z wykorzystaniem przetworników tensometrycznych. Dokładniejsze mierzenie masy w przemyśle lub laboratorium wymaga zastosowania znacznie bardziej skomplikowanych systemów wagowych → przetwornik magnetoelektryczny. Ich dokładność jest gwarantowana dzięki okresowej adiustacji. Przykładowe systemy wagowe wykorzystywane w wagach produkcji Radwag pokazano na rysunku 16.



Rysunek 16. Systemy wagowe z przetwarzaniem elektromagnetycznym

- a. układ elektromagnetyczny, monolityczny, zakres obciążeń 6 ÷ 300 kg
- b. układ elektromagnetyczny zakres obciążeń 50 g ÷ 1000 g
- c. układ elektromagnetyczny zakres obciążeń 2 g ÷ 50 g

Zadaniem adiustacji jest korekta wskazań wagi, którą uzyskuje się w wyniku porównania wyniku ważenia wzorca (tzw. masy adiustacyjnej) z jej znaną wartością. Porównania te są wykonywane automatycznie → zmiana temperatury, upływ czasu lub półautomatycznie przed rozpoczęciem badań → ingerencja operatora wagi. Masa adiustacyjna nie jest wzorcowana, tak jak wzorce zewnętrzne. Wzorcowanie jako procedura pokazująca „dokładność” wskazań jest realizowana dla wagi jako całości, więc de facto także w odniesieniu do wartości wewnętrznej masy adiustacyjnej. Zasadę adiustacji pokazano na rysunku 17, jest ona identyczna dla każdej wagi, a poprawność działania tego układu jest weryfikowana w firmie Radwag przez Dział KJ.



Rysunek 17. Ogólna zasada działania adiustacji wagi elektronicznej

Adiustacja wagi jest typowym ważeniem obciążenia, więc z metrologicznego punktu widzenia, jakość tego procesu może być definiowana przez precyzję pomiaru. Jak wiadomo precyzja każdego pomiaru jest dość mocna zależna od warunków w jakich pomiar jest wykonywany oraz umiejętności operatora. Należy zauważyć że automatyzacja adiustacji oraz zabudowanie wewnątrz wagi masy adiustacyjnej znacznie zwiększa precyzję pomiaru względem pomiarów wykonywanych manualnie. Jest to szczególnie istotne i pożądane gdyż na podstawie wyniku ważenia masy adiustacyjnej dokonywana jest korekta czułości wagi.

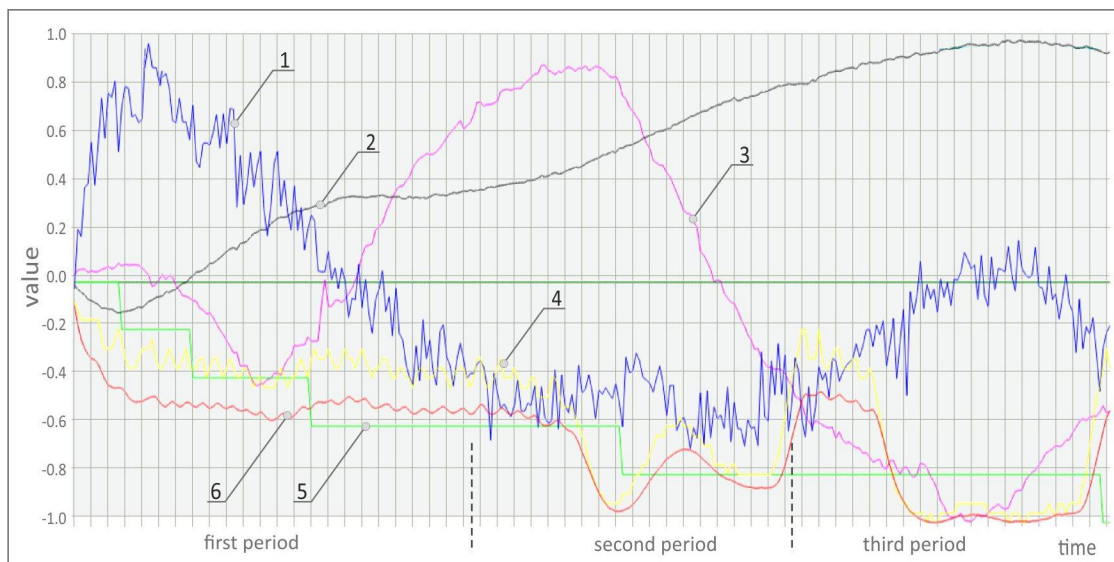
Nie istnieje jedno uniwersalne rozwiązanie techniczne dla adiustacji, gdyż jest ona zawsze integralną częścią wagi, w zakresie kształtu, lokalizacji, wymiarów oraz zasady działania. Przykład adiustacji wag laboratoryjnych pokazano na rysunku 18.



Rysunek 18. Widok masy adiustacyjnej systemu wagowego mikrowagi serii MYA oraz wagi analitycznej serii XA

Jak wspomniano wcześniej parametrem jakościowym adiustacji jest precyzja pomiaru, którą można wyznaczyć poprzez funkcję diagnostyczną Autotest GLP. Jest ona dostępna w menu większości wag laboratoryjnych produkcji Radwag. Zasada działania Autotestu GLP polega na wyznaczeniu odchylenia standardowego → miara precyzji pomiaru, z serii 10-krotnego ważenia wewnętrznej masy adiustacyjnej. Otrzymana wartość odchylenia standardowego jest zazwyczaj mniejsza od wartości działki elementarnej badanej wagi.

Masa adiustacyjna w wagach serii .4Y oraz .5Y jest także wykorzystywana jako narzędzie diagnostyczne podczas produkcji i kontroli wag. Okresowe ważenie masy adiustacyjnej w stabilnych i zmiennych warunkach środowiskowych pozwala na wyznaczenie optymalnych współczynników korygujących wpływ środowiska na dokładność pomiaru masy. Jest to autorskie rozwiązanie stosowane w profesjonalnych wagach laboratoryjnych tak jak np. mikrowagi serii MYA oraz wagi analityczne serii XA. Z drugiej strony możliwość obserwacji i rejestracji zmian zachodzących w wadze jest pierwszym krokiem dla optymalizacji konstrukcji wag oraz komparatorów masy o wysokich rozdzielczościach → doskonalenie produktu. Analiza otrzymanych wyników z takich testów polega na porównaniu wskaźników jakościowych z wartościami dopuszczalnymi. Jest to możliwe także w przypadku wag już eksploatowanych, ale wymaga zdalnej ingerencji serwisu. Na podstawie danych pomiarów można określić dynamikę zmian środowiska pracy w którym pracuje waga, przekonanie użytkownika o stabilności warunków pracy nie zawsze ma pokrycie w rzeczywistości. Przykład wykresu zawierającego dane z Autotestu wagi analitycznej XA 82/220.5Y przedstawiono na rysunku 19.



Rysunek 19. Autotest – waga XA 82/220.5Y

XA 82/220.5Y, Obciążenie maksymalne 220g, działka elementarna $d=0.01\text{mg}$

1 – zmiana czułości, 2 – dryft zera wagi, 3 – ciśnienie atmosferyczne, 4 – temperatura wewnętrzna wagi,
5 – wilgotność względna w miejscu pracy, 6 – temperatura przetwornika wagi

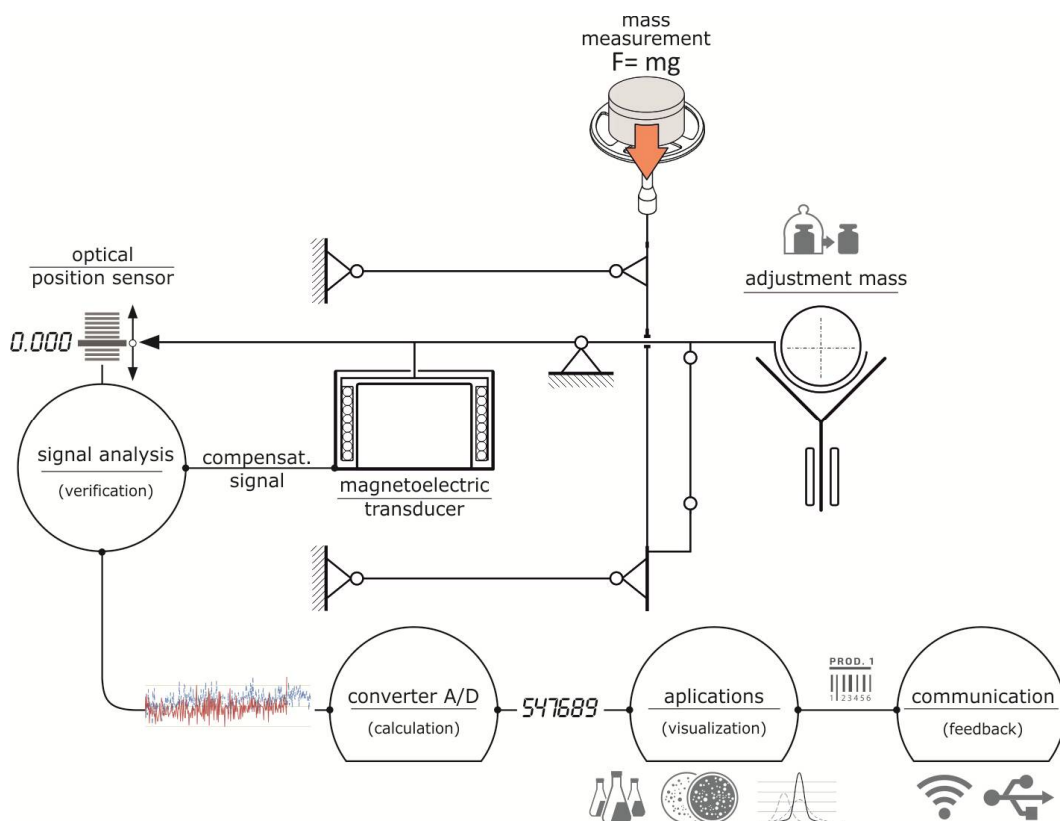
W pierwszym okresie badania widoczna jest stabilizacja temperatury przetwornika (6) oraz temperatury wewnętrznej wagi (4). Pomimo tego obserwuje się zmianę czułości wagi, krzywa oznaczona numerem (1), gdyż dla poprawnego działania wagi wymaga jest także stabilność termiczna układu mechanicznego. Okres pierwszy w pewnym uproszczeniu można porównać do czasu nagrzewania własnego wagi, po którym osiąga ona zakładaną dokładność pomiaru. Czułość wagi osiąga stabilizację na początku okresu drugiego i utrzymuje się na nawet wtedy gdy w badaniu wymuszono okresową zmianę temperatury zewnętrznej, co skutkowało zmianą temperatury przetwornika (6) i temperatury wewnętrznej (4). Istotna zmiana czułości wagi jest obserwowana dopiero wtedy, gdy zmiana temperatury zewnętrznej jest trwała – okres trzeciego badania.

Czas aklimatyzacji wag o dużej rozdzielczości wynosi praktycznie 24 godziny, co wynika głównie z czasu potrzebnego do osiągnięcia stabilnej temperatury przez elementy mechaniczne związane z detekcją i przekazywaniem siły grawitacyjnej. Z tego powodu krzywa pokazująca zmiany punktu zerowego wagi (2) wykazuje stabilność dopiero po trzecim okresie badania. Należy zauważyć, że zjawisko zmiany punktu zerowego wagi nie jest krytyczne, gdy czas pomiaru jest dość krótki, tak jak w wagach serii XA. Oceniając przebieg krzywych z Autotestu serwisowego zawsze należy uwzględniać rzeczywiste potrzeby użytkownika w zakresie dokładności pomiaru masy.

Jak wspomniano wcześniej rozwój systemów wagowych w kierunku zwiększania ich dokładności pomiaru nie jest możliwy bez dokładnych badań. Efektem takich badań są zmiany technologiczne i konstrukcyjne oraz dalsze badania. Jest to dość trudne zagadnienie, gdyż działania są prowadzone na styku informatyki, elektroniki i mechaniki systemów wagowych.

4. Pomiary w skali mikro

Zasada działania wagi elektronicznej polega na ciągłym utrzymywaniu szalki wagi w położeniu równowagi oraz kompensacji odchylenia szalki wyważonej z tego położenia, gdy jest ona obciążona dowolnym ładunkiem, rysunek 20. Sygnał kompensujący siłę grawitacyjną jest skalowany względem certyfikowanych wzorców masy, co pozwala wynik ważenia przedstawić w jednostkach miary, gram, miligram, kilogram itd.



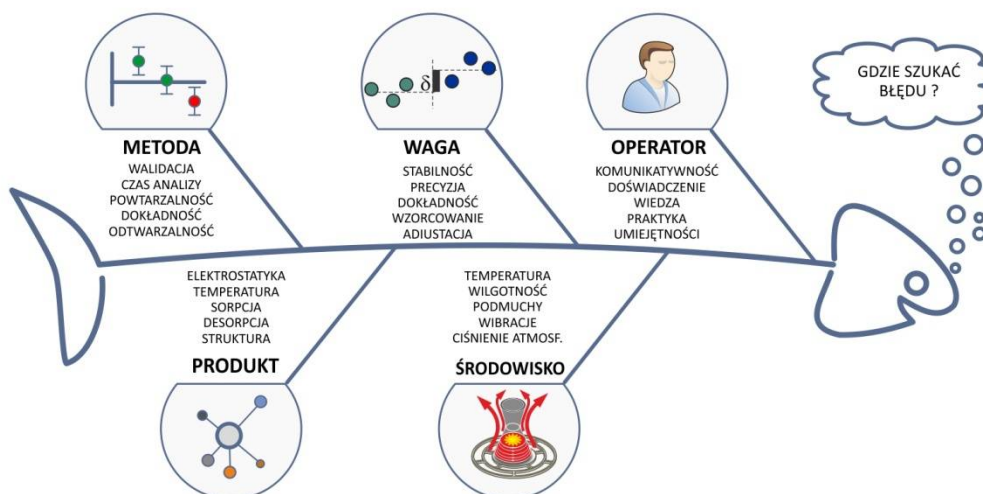
Rysunek 20. Ogólna zasada działania wagi z przetwornikiem magnetoelektrycznym

Im większa masa próbki, tym łatwiej zmierzyć siłę, gdyż udział innych czynników fizycznych towarzyszących procesowi ważenia (niestabilność środowiska, błąd operatora, czułość wagi) jest pomijalny. Poprawna detekcja bardzo małych wartości wymaga optymalizacji konstrukcji wagowej w zakresie mechaniki oraz rozwiązań elektroniczno-informatycznych, tak jak to wykonano w przypadku komparatorów masy, mikrowag oraz ultra-mikrowag produkcji Radwag. Dzięki temu osiągnięto długookresową stabilność i dokładność pomiarów, która jest pożądana w badaniach R&D oraz podczas wielu procesów kontrolnych np. farmacja.

Dokładne odmierzenie ilości należy traktować jako proces, którego finalny rezultat jest zależny od kilku czynników. Mają one swoje źródło w środowisku pracy, urządzeniu, ważonej próbce oraz wiedzy i umiejętnościach operatora wagi, rysunek 21.

W przypadku, gdy wynik ważenia znajduje się poza wymaganą tolerancją, należy przeprowadzić analizę ryzyka, która powinna wskazać te obszary związane z pomiarem masy, które

mają największy wpływ na błąd pomiaru. Może to być trudne, ale jest to jeden z elementów doskonalenia → koło Deminga, który pozwala osiągać zakładany poziom jakości procesu, produktu.



Rysunek 21. Źródła błędów w pomiarach masy

Zazwyczaj metoda ważenia jest zdefiniowana przez normy PN-EN, ASTM, przewodniki ISO lub inne uznane i przyjęte do stosowania dokumenty branżowe, wewnętrzne lub zewnętrzne. Wymagania mogą dotyczyć masy próbki, sposobu jej poboru, przechowywania i tolerancji odważania. Należy pamiętać że próbki nie są neutralne i mogą być niestabilne ze względu na sorpcję wilgoci, niezrównoważone ładunki elektrostatyczne oraz niestabilność termiczną. Środowisko pracy również może mieć wpływ na proces ważenia, gdy jego zmienność w zakresie temperatury, wilgotności, ruchu powietrza oraz drgań będzie zbyt duża.



Rysunek 22. Waga XA 82/220.5Y, pomiar masy filtra, Mikrowaga MYA 2.5Y, pomiar masy kapsułki – jednolitość masy preparatów medycznych (USP)

Waga analityczna XA 82/220.5Y, Obciążenie maksymalne 220g, działka elementarna d=0.01mg, certyfikat OIML
 Mikrowaga MYA 2.5Y, Obciążenie maksymalne 2g, działka elementarna d=0.001mg, certyfikat OIML

Zmienność środowiska pracy może być monitorowana przez czujniki wewnętrzne zainstalowane w wagach serii 5Y → zielone ikony na wyświetlaczu wagi, rysunek 22.

Jest to profesjonalne rozwiązanie dla każdego laboratorium w zakresie nadzoru nad zmiennością warunków pracy. Możliwe jest także podłączenie do złącza USB wagi dodatkowych zewnętrznych czujników temperatury i wilgotności → wzorcowanie, które będą monitorować środowisko pracy.



Rysunek 23. Waga XA 210.5Y.A z dodatkowym czujnikiem warunków środowiskowych

Waga analityczna XA 210.5Y.A, Obciążenie maksymalne 210g, działka elementarna $d=0.01\text{mg}$, certyfikat OIML
Interfejsy: USB-A x2, USB-C, HDMI, Ethernet, Wi-Fi®, Hotspot

Informacja o zmierzonych wartościach, temperatura, wilgotność, drgania, gęstość powietrza, jest eksponowana na wyświetlaczu wagi lub bezpośrednio na panelu kontrolnym czujnika warunków środowiskowych THB-Pro (rysunek 24).



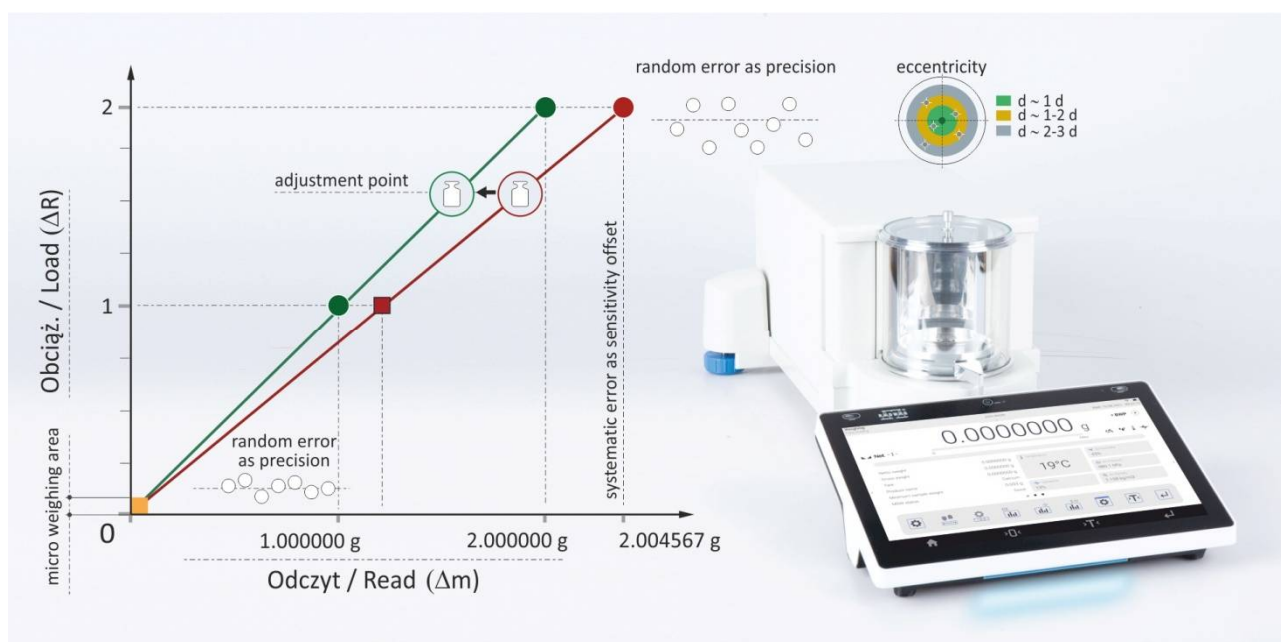
Rysunek 24. Czujnik warunków środowiskowych THB-Pro

Działka elementarna pomiaru temperatury 0.01°C , pomiar wilgotności 0.1% , ciśnienie atmosf. 0.1hPa
Dokładność pomiaru temperatury $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$, wilgotności $\pm 0.2\%$
Zasilanie czujnika – poprzez USB lub zasilacz, znormalizowane złącze typu C

Jak wiadomo odmierzenie pewnej ilości w skali mikro wymaga ważenia brutto, pierwszym krokiem jest zatem wybór odpowiedniego naczynia wagowego. Powinno ono być wykonane z materiałów które są obojętne, czyli nie mają tendencji do gromadzenia ładunków statycznych na swoich powierzchniach.

Mając na uwadze opisane powyżej zależności można stwierdzić, że dokładność pomiaru w skali mikro może być zaburzana przez wiele czynników, które wzajemnie wpływają na siebie. Pomimo tego, potencjalną dokładność pomiaru masy można określić poprzez sprawdzenie precyzji pomiaru w miejscu użytkowania wagi. Ten test wykonywany jest zazwyczaj wzorcem o masie zbliżonej do masy ważonych próbek. Odchylenie standardowe (S) z serii pomiarów jest tu miarą nieprecyzyjności, im wartość (S) mniejsza tym lepsza zbieżność wyników w serii → lepsza precyzja pomiarów. Jak wiemy precyzja pomiaru jest błędem losowym, a na dokładność pomiaru wpływ ma także błąd systematyczny → błąd czułości. Co zatem?.

Jeżeli czułość wagi jest liniową zależnością obciążenie/wskazanie → $\Delta R/\Delta m$, to korekta czułości będzie skuteczna, gdy masa adiustacyjna będzie mieć wartość co najmniej 75% ÷ 85% maksymalnego obciążenia wagi, rysunek 25. Błąd czułości → błąd systematyczny może być zauważalny tylko wówczas, gdy masa ważonych próbek jest większa niż 10% wartości obciążenia maksymalnego wagi. Gdy masa odważanych próbek jest bardzo mała błąd systematyczny jest nieistotny, a głównym składnikiem błędów pomiaru jest błąd losowy.



Rysunek 25. Mikrowaga MYA 21.5Y – błąd losowy i systematyczny w pomiarach mikro

Mikrowaga MYA 21.5Y, Obciążenie maksymalne 21g, działka elementarna d=0.001mg, certyfikat OIML

Interfejsy: USB-A x2, USB-C, HDMI, Ethernet, Wi-Fi®, Hotspot

Wartość błędów losowych dla tzw. małej masy /micro weighing area (rys. 25) /można szybko wyznaczyć doświadczalnie → odtwarzalność, lub przyjąć wartości podane przez producenta. Nie zawsze obiekt ważony ma odpowiedni kształt lub jest cieżką, więc wykorzystywane są specjalne uchwyty wagowe umożliwiające ważenie kolb, mikro-naczyń, zlewek, stentów, elementów o nieregularnych kształtach itd.

5. Automatykacja w pomiarach masy

Główną cechą każdego pomiaru powinna być jego użyteczność, czyli możliwość wykorzystania pozyskanej informacji do oceny stanu fizyko-chemicznego próbki, stwierdzenia zgodności z wymaganiami, możliwości jej dalszego przetwarzania itd. Pomiaru jednostkowe szybko wykona operator, wyciągając jednocześnie wnioski z własnych obserwacji. Praca ludzka staje się nieopłacalna i mało wydajna gdy należy przetworzyć dużą ilość informacji w krótkim okresie czasu, wtedy sięgamy po automatyzację. Taki sposób pracy jest stosowany w zautomatyzowanych liniach produkcyjnych, gdzie bez ingerencji operatora sprawdzane są istotne cechy produktu, w tym także jego masa → wagi dynamiczne. Istotna jest wydajność linii produkcyjnej (ilość szt./ min.), możliwość segregacji produktów oraz możliwość ich oznaczania. Przykładem takiego rozwiązania jest waga dynamiczna serii DWR, produkcji firmy Radwag (rys. 26).



Rysunek 26. Waga automatyczna DWM 7500

DWM 7500, Obciążenie maksymalne 7500g, działka elementarna $d=0.1g$, klasa dokładności XIII (1), Y (a)
Wydajność Max 500szt./min. Legenda: 1 – podajnik wejściowy, 2 – detektor metali,
3 – podajnik wagowy (pomiar masy), 4 – podajnik wyjściowy, 5 – pneumatyczna selekcja elementów,
6 – kosz do segregowanych elementów, 7 – wyświetlacz wagi, 8 – sygnalizacja świetlna.

Konstrukcja i zasada działania wag automatycznych jest zawsze optymalizowana do konkretnego zastosowania → linie technologiczne oraz środowiska pracy → system informatyczny.

Automatyzacja pomiarów masy jest także możliwa w skali mikro, ale wymaga bardziej subtelnych rozwiązań techniczno – informatycznych. Przykładem takiego rozwiązania jest system automatyczny dedykowany do sprawdzania i wzorcowania pipet wielokanałowych. Zasada działania pipety tłokowej jest zawsze taka sama niezależnie od jej konstrukcji – nacisk ręczny lub automatyczny na tłok powoduje pobór lub wydalenie porcji cieczy z otworu pipety w celu dozowania. Kontrola dokładności działania pipety polega na zmierzeniu masy dozowanej przez pipetę cieczy, co przy znanej gęstości cieczy pozwala na wyznaczenie jej objętości, która jest równa objętości pipety. Taki proces pokazano na rysunku 27.

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (6)$$

gdzie: V objętość cieczy wydalonej z pipety (cm³)
m masa cieczy (g)
ρ gęstość cieczy (g/cm³)



Rysunek 27. Kontrola objętości pipet jednokanałowych

Mikrowaga MYA 21.5Y.P Obciążenie maksymalne 21g, działka elementarna d=0.001mg, certyfikat OIML
Wyposażenie do kontroli pipet: kurtyna parowa, naczynie wagowe, aplikacja użytkownika, zgodność z ISO 8655-6.
Interfejsy: USB-A x2, USB-C, HDMI, Ethernet, Wi-Fi®, Hotspot

Weryfikacja działania pipety dotyczy co najmniej kilku objętości i jest procesem czasochłonnym, gdy dotyczy pipet wielokanałowych. Przyspieszenie tego procesu jest możliwe tylko poprzez automatyzację. Urządzeniem realizującym szybko i sprawnie takie zadanie jest układ automatyczny AP 12.5Y. W procesie badania pipet tłokowych metodą grawimetryczną zawsze rejestrowana jest masa wydalonej cieczy, należy zatem dokonać konwersji wyników ważenia na objętość. Można to wykonać dwiema metodami. W pierwszej metodzie należy wykorzystać ogólny wzór (7) pozwalający wyliczyć objętość cieczy z uwzględnieniem istotnych czynników środowiskowych.

$$V_{i,ref} = (m_L - m_E + m_{evap}) \times \frac{1}{\rho_w - \rho_a} \times \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_b}\right) \times [1 - \gamma(t_w - t_{ref})] \quad (7)$$

- gdzie: $V_{i,ref}$ obliczona objętość cieczy w temperaturze znamionowej w ml,
 m_L wskazanie wagi dla naczynka wagowego po podaniu cieczy w g,
 m_E wskazanie wagi dla naczynka wagowego przed podaniem cieczy w g ($m_{mi} = 0$ w przypadku tarowania wagi naczynkiem wagowym)
 m_{evap} szacunkowa masa odparowana w cyklu testowym w g,
 ρ_A gęstość powietrza w g/ml podczas badania, ρ_B - gęstość wzorca masy (8 g/ml),
 ρ_w gęstość wody w temperaturze badania (w °C) w g/ml,
 γ współ. rozszerzalności cieplnej objętościowej pipety (°C⁻¹),
 t_w temperatura pipety = temp. cieczy testowej w °C; t_{ref} - temp. znamionowa pipety (20°C lub 27°C).



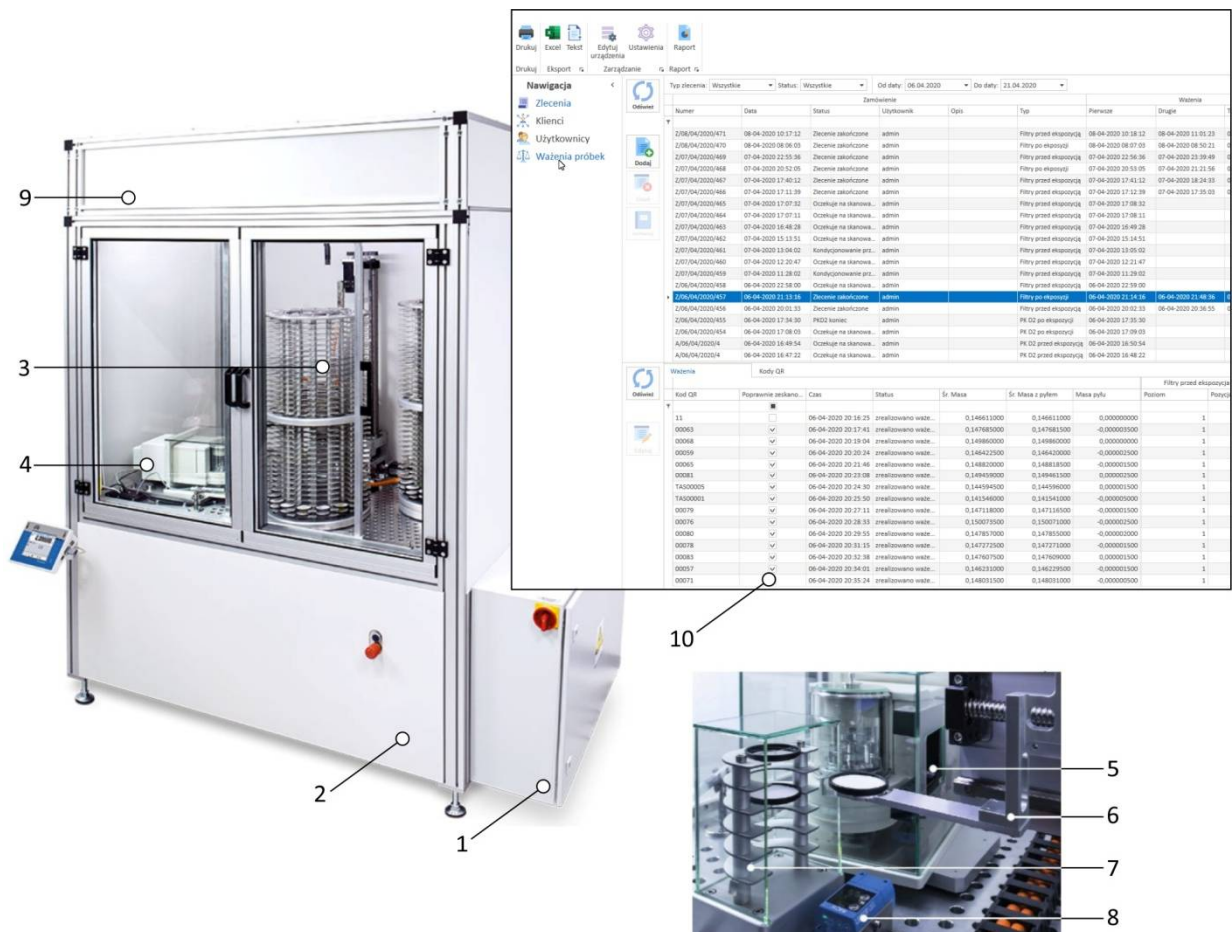
Rysunek 28. System automatyczny AP-12.1.5Y

Obciążenie maksymalne 21g, działka elementarna d=0.001mg, Max ilość kanałów 12.
 Aplikacja użytkownika, zgodność z ISO 8655-6, Interfejsy: USB-A x2, USB-C, HDMI, Ethernet, Wi-Fi®, Hotspot

Metoda druga jest prostsza gdyż wszystkie w/w czynniki zostały uwzględnione w tzw. wskaźniku korygującym Z (równanie 8), którego wartość uwzględnia gęstość wody, ciśnienia atmosferycznego i temperatury w jakim jest prowadzone badanie.

$$V_i = m_i \times Z \quad (8)$$

Układy automatycznego pomiaru masy są stosowane także w badaniach związanych z ochroną środowiska → standardowa grawimetryczna metoda pomiarowa do określania stężeń masowych frakcji PM 10, PM 2.5 pyłu zawieszonego. Jak wiadomo, masa pyłu jest wyznaczana z różnicy mas filtrów przed ekspozycją oraz filtrów po ekspozycji. Istotnym elementem w tym procesie jest kondycjonowanie filtrów w ustalonych warunkach temperatury i wilgotności. Zapewnienie wymaganych warunków kondycjonowania filtrów nie zawsze jest proste i możliwe do realizacji, zwłaszcza gdy wymaga to przebudowy istniejącej infrastruktury, wtedy sięga się po robotyczne systemy wagowe, takie jak np. RB 2.5Y lub RMC 2.5.Y.FC, rys. 29.



Rysunek 29. RB 2.5Y – kondycjonowanie i pomiar masy filtrów

Maksymalne obciążenie 2g, działka elementarna d=0.001mg, Max ilość filtrów 1000

- Kondycjonowanie filtrów wg. EN 12341:2024, sterowanie: aplikacja komputerowa, 1- układ sterowania, 2 – obudowa
 3 – magazyn filtrów, 4 – mikrowaga (pomiar masy), 5 – dejonizator, 6 – ramię robotyczne,
 7 – magazyn wzorców masy i filtrów referencyjnych, 8 – czytnik kodów QR, 9 – filtry HEPA, 10 – aplikacja komputerowa

Każdy z filtrów jest oznaczony kodem QR, który pozwala na jednoznaczną jego identyfikację niezależnie od miejsca w magazynie. Odpowiednio duża pojemność magazynu pozwala na jednoczesne kondycjonowanie → przygotowanie filtrów do pomiarów realizowanych w terenie oraz ważenie filtrów po ekspozycji → określenie stężenia masowego pyłu PM. Magazyn wzorców masy i filtrów referencyjnych (7) jest wykorzystywany do określania stabilności pracy układu wagowego oraz potencjalnego wpływu warunków środowiskowych na zmienność masy filtrów badanych.

Podobny automatyczny układ wagowy jest stosowany w przemyśle motoryzacyjnym do oceny masowej emisji cząstek stałych emitowanych przez silniki spalinowe. Opis i wymagania dla metody pomiarowej mającej zastosowanie w motoryzacji zawiera Rozporządzenie EU nr 2017/1151 w sprawie homologacji typu pojazdów silnikowych w odniesieniu do emisji zanieczyszczeń pochodzących z lekkich pojazdów pasażerskich i użytkowych oraz dokument United States Environmental Protection Agency 40 CFR Part 1065 - Engine-Testing Procedures. Istotnym wymaganiem metrologicznym jest konieczność zastosowania do pomiarów masy wagi lub systemu wagowego z działką elementarną $0.1\mu\text{g}$, przy akceptowanej precyzji pomiaru. Uzyskanie takiej dokładności pomiaru wymaga zastosowania innej metody ważenia, w której każdy z filtrów jest umieszczony w specjalnym pojemniku tak jak w przypadku układu automatycznego UMA 2.5Y.FC oraz RMC 2.5Y.FC (rysunek 30).



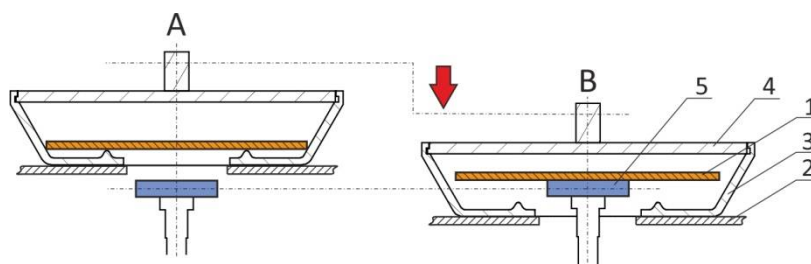
Rysunek 30. Hamownia podwoziowa oraz układ automatyczny do pomiaru masy filtrów.

UMA 2.4Y.F, Maksymalne obciążenie 2g, działka elementarna $d=0.0001\text{mg}$, Max ilość filtrów 24

Kondycjonowanie filtrów w laboratorium, sterowanie: aplikacja komputerowa

Źródło: Instytut Badań i Rozwoju Motoryzacji BOSMAL Sp. z o.o. – badania w ramach projektu BOS/0779/BH/21

Ograniczenie przestrzeni w której jest ważony filtr oraz wyeliminowanie tzw. czynnika ludzkiego pozwala na uzyskanie precyzji pomiaru na poziomie $0.2 \div 0.3 \mu\text{g}$, co jest nieosiągalne w przypadku pomiarów manualnych. Schemat kontenera filtrów pokazano na rysunku 31.



Rysunek 31. Kontener filtrów

1 – filtr, 2- magazyn filtrów, 3 – obudowa kontenera,
4 – górna osłona kontenera, 5 – szalka układu wagowego

Jak wiadomo wynik pomiaru dość silnie jest zależny od warunków kondycjonowania filtrów, co wymaga utrzymania w laboratorium temperatury w zakresie $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ oraz wilgotności względnej $45\% \pm 8\%$ (źródło Rozp. UE 2017/1151, pkt 4.2.2). To może być kosztowne i trudne do realizacji, ale takie warunki zapewnia wewnętrzna przestrzeń układów automatycznych wyposażonych we własny system klimatyzacji → UMA 5.5Y.FC oraz RMC 2.5Y.FC. Gdy ilość filtrów do badania jest dość znaczna, dedykowanym rozwiązaniem jest układ robotyczny serii RMC, który poza klimatyzacją posiada wewnętrzny magazyn filtrów, 136 pozycji. Taka ilość pozwala na jednoczesne kondycjonowanie i ważenie filtrów w dowolnych konfiguracjach. Widok takiego układu wagowego pokazano na rysunku 32.



Rysunek 32. RMC 2.5Y.FC – pomiar masy filtrów w cyklu automatycznym

Obciążenie Max 2g, działka elementarna 0.001 mg lub 0.001 mg, Zgodność z normą EN 12341:2024,
1 – obudowa 2- magazyn filtrów, 3 – układ robotyczny, 4 – mikrowaga (pomiar masy), 5 – panel operatora, 6 – filtr HEPA

Obecnie normy emisji cząstek stałych emitowanych przez silniki spalinowe wynoszą $4.5\text{mg}/\text{km}$ (Euro 6c,d; China 6a) i mają być zmniejszone o około 30 % w przyszłości. Ograniczenie emisji wymaga przygotowania odpowiedniego stanowiska badawczego, które musi umożliwić mierzenie dokładniej → lepsza precyzja pomiaru. Jak wiadomo precyzja pomiaru to kluczowy parametr metrologiczny mocno zależny od warunków badania, czynników środowiskowych oraz od niedoskonałości pracy ludzkiej. Wydaje się zatem, że jednym słusznym kierunkiem rozwoju metod pomiarowych dedykowanych dla motoryzacji jest automatyzacja.

6. Metrologia w badaniach naukowych

Metrologia jako nauka, ale i praktyka pomiarów masy była i jest mocno związana z badaniami naukowymi. Ciągłe coś odmierzamy w skali makro lub mikro, porównujemy produkty ze wzorcem, określamy poziom bezpieczeństwa, zwłaszcza w farmacji, gdyż tak jest zbudowany współczesny świat. W tym procesie udoskonalania naszej rzeczywistości osiągnięcia naukowe są bezcenne, gdyż tylko one wytyczają kierunki rozwoju oraz dają rozwiązania dla ważnych problemów społecznych. Można oczywiście bazować tylko na empirycznym odkrywaniu nowych rozwiązań ale to proces zazwyczaj długi, kosztowny bez pewności jego powodzenia.

6.1. Stabilność masy filtrów w czasie

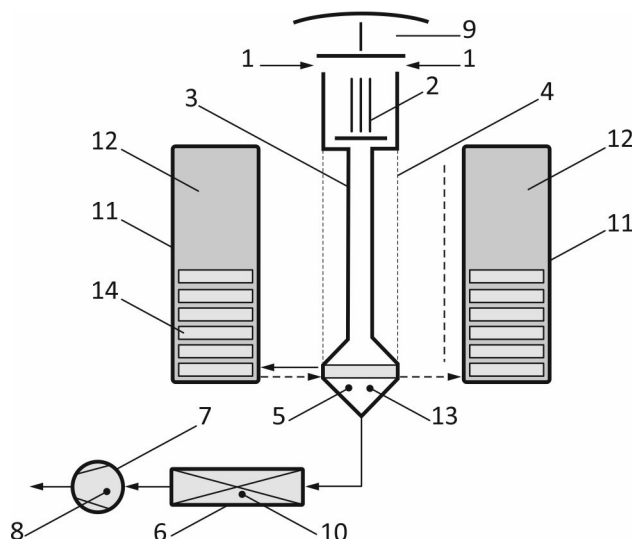
Badanie jakości powietrza atmosferycznego zawsze było istotnym czynnikiem, ale jego ranga wzrosła, gdy widoczne zmiany środowiskowe takie jak burze, huragany, powodzie stały się powszechnością w niektórych częściach świata, a dane naukowe dotyczące śmiertelności ludzi w efekcie zanieczyszczeń powietrza potwierdzają istotny związek przyczynowo-skutkowy. Poprawa tego stanu nie jest możliwa poprzez jednorazowy akt, ale wymaga prowadzenia badań w bardzo szerokim zakresie, od przemysłu do laboratorium. Jednym z elementów tych badań był projekt badawczy C2-001/2020/NP-I „Badania metodą referencyjną PN-EN 12341:2014 emisji pyłu zawieszonego PM z wykorzystaniem robotycznego systemu wagowego RB 2.4Y.F, który zrealizowano w Instytucie Podstaw Ochrony Środowiska Polskiej Akademii Nauk w Zabrze.

Należy zauważyć, że metoda grawimetryczna jest uznana jako najbardziej precyzyjna metoda pomiaru masy pyłu zawieszonego. W metodzie tej używa się tzw. poborników pyłowych w których instaluje się zazwyczaj 14 kaset z filtrami. Masa tych filtrów masa została uprzednio wyznaczona w procesie ważenia grawimetrycznego. Każdy filtr jest następnie automatycznie umieszczany w tunelu o stałym przepływie powietrza (rys. 34) przez okres 24 godzin. W tym czasie struktura filtra gromadzi cząstki pyłu PM charakterystyczne dla danego miejsca i czasu poboru.



Rysunek 33. Schemat metody badania ilości pyłu zawieszonego wg. EN 12341:2024

Po zakończeniu ekspozycji filtr z cząstkami PM jest automatycznie usuwany z tunelu a w jego miejsce pobornik instaluje kolejną kasetę z czystym filtrem rozpoczynając kolejny cykl pomiarowy. Przykładowy schemat pobornika pokazano na rysunku 34.



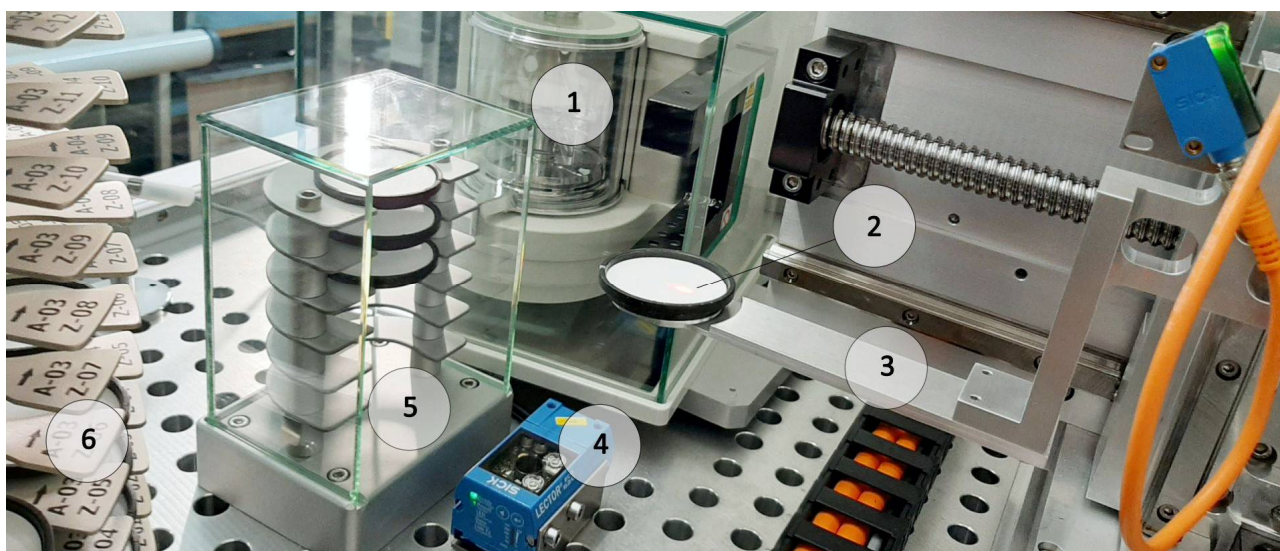
Rysunek 34. Schemat pobornika

1 – próbka powietrza (T_a , P_a), 2 – wlot impaktora, 3 – obudowa pobornika, 4 – wlot powietrza, 5 – uchwyt filtra, 6 – pomiar przepływu powietrza, 7 – pompa, 8 – układ kontroli przepływu, 9 – pomiar ciśnienia i temperatury, 10 - pomiar ciśnienia i temperatury (opcja), 11 – magazyn filtrów, 12 – pomiar temperatury przechowywania filtrów, 13 – pomiar temperatury w pobliżu filtra podczas absorpcji, 14 – filtr

Istotnym elementem metody grawimetrycznej mającym znaczny wpływ do dokładność prowadzonej analizy jest kondycjonowanie filtrów przed i po ekspozycji. W tym procesie określa się kilkakrotnie masę filtrów w stabilnych warunkach temperatury i wilgotności. Ma to na celu wyznaczenie średniej masy filtra przed i po ekspozycji, która będzie wykorzystana później w obliczeniach koncentracji pyłu zawieszonego. Według normy², temperatura kondycjonowania filtrów powinna się zawierać w zakresie $19 \div 21^\circ\text{C}$, a wilgotność względna w zakresie $45 \div 50\%$. Można stwierdzić że mało prawdopodobne jest utrzymanie w laboratorium w długim okresie czasu idealnie stabilnych warunków, więc z zasady są one zmienne. Jeżeli tak jest, to powstaje pytanie, w jakim zakresie będzie zmienna masa filtra, gdy wilgotność i temperatura będą oscylować w zdefiniowanych przez normę limitach. Problem jest istotny, gdyż celem wyznaczenia ilości pobranego pyłu dokonuje się dwukrotnego pomiaru masy filtra → ważenie różnicowe, a w badaniach mogą być stosowane różnego rodzaju filtry, kwarcowe, z włókna szklanego, teflonowe, nylonowe, poliwęglanowe itd.

Widok istotnych elementów układu pomiarowego RB 2.4Y przedstawiono na rysunku 35. Wszystkie badane filtry oznaczono przed rozpoczęciem badań kodem QR, który zapewnił ich jednoznaczną identyfikację w cyklu badań. Cykl badawczy zrealizowano zgodnie z wymaganiami normy EN 12341 w zakresie warunków środowiskowych jak i dopuszczalnych tolerancji zmian masy filtrów. Cykl kondycjonowania oraz pomiaru masy filtrów był sterowany poprzez zewnętrzny program komputerowy.

² EN 12341:2024 „ Ambient air - Standard gravimetric measurement method for the determination of the PM10 or PM2,5 mass concentration of suspended particulate matter”,



Rysunek 35. Proces weryfikacji i ważenia filtra – układ robotyczny RB 2.4Y

W magazynie (6) każdy z filtrów był umieszczony w antystatycznym uchwycie. Następnie ramię robotyczne (3) pobierało filtr (2) i transportowało go do komory ważenia mikrowagi (1). Filtr przesuwiał się ponad czytnikiem kodów QR (4) i był rejestrowany w systemie nadrzędnym jako próbka aktualnie ważona. Komora ważenia mikrowagi (1) była otwierana automatycznie, a ramię robotyczne umieszczało filtr na szalce mikrowagi. Następnie komora ważenia była zamykana celem dokładnego określenia masy filtra. Po zakończeniu ważenia komory mikrowagi była otwierana a ramię robotyczne zwrótnie umieszczało filtr w magazynie. Magazyn filtrów referencyjnych i wzorca masy (5) by wykorzystywany okresowo do badania potencjalnych dryftów czułości układu robotycznego oraz wpływu warunków środowiskowych na zmienność masy filtrów referencyjnych.

Działka elementarna dla pomiaru masy podczas badań wynosiła 1 mikrogram (10^{-6} g), ale jak wspomniano wcześniej, dokładność ważenia obiektów o małych masach jest zależna tylko od wartości błędu losowego. Podczas badań wstępnych stwierdzono, że precyzja pomiaru masy filtra QMA o średnicy 47 mm zawiera się w przedziale $1\mu\text{g} \div 2.1\mu\text{g}$. Filtry PTFE przed ważeniem wymagały dejonizacji ze względu na niezrównoważone ładunki statyczne. Proces dejonizacji powinien być do optymalizowany do ilości ładunków jakie należy zneutralizować.

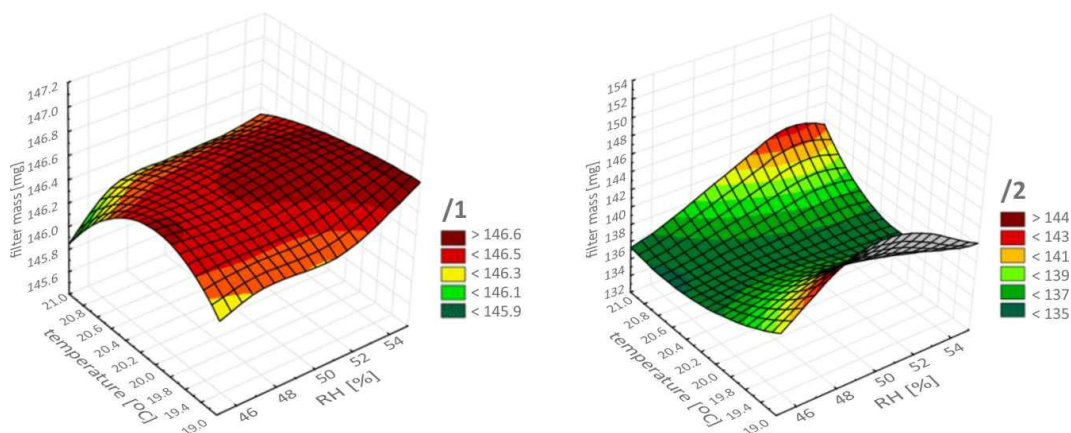
Stwierdzono w trakcie badań, że wpływ zmiennych warunków kondycjonowania (~ 19.5 do 20.5°C ; zakres wilgotności względnej powietrza $\sim 40-45\% \text{RH}$) nie wpływał negatywnie na stabilność pomiaru masy filtrów stosowanych do poboru pyłu zawieszonego, niezależnie od rodzaju materiału filtracyjnego. Zmienność masy filtrów z włókna kwarcowego zawierała się w zakresie $148.84 \div 150.34\text{mg}$, a dla filtrów wykonanych z teflonu (PTFE) w zakresie $134.38 \div 136.25\text{mg}$.

Dla filtrów z włókna szklanego otrzymano zmienność masy w zakresie $89.61 \div 92.55\text{mg}$, a dla membran poliamidowych (filtry nylonowe) w zakresie $73.16 \div 75.31\text{mg}$. Filtry wykonane z membrany poliestrowej (tzw. poliwęglan) cechowały się zmiennością masy w zakresie $34.13 \div 36.03\text{mg}$. Na podstawie pomiarów oszacowano równania regresji liniowej dla badanych filtrów³, które pokazują zmienność masy filtrów w zależności od zmian temperatury i wilgotności.

$$\begin{aligned}
 m_{QMA} &= m_{QMA} + 0.003RH + 0.015T \\
 m_{GF/A} &= m_{GF/A} + 0.018RH + 0.055T \\
 m_{PTFE} &= m_{PTFE} + 0.186RH - 1.473T \\
 m_{NL} &= m_{NL} + 2.242RH - 2.907T \\
 m_{PC} &= m_{PC} + 0.004RH - 0.046T
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

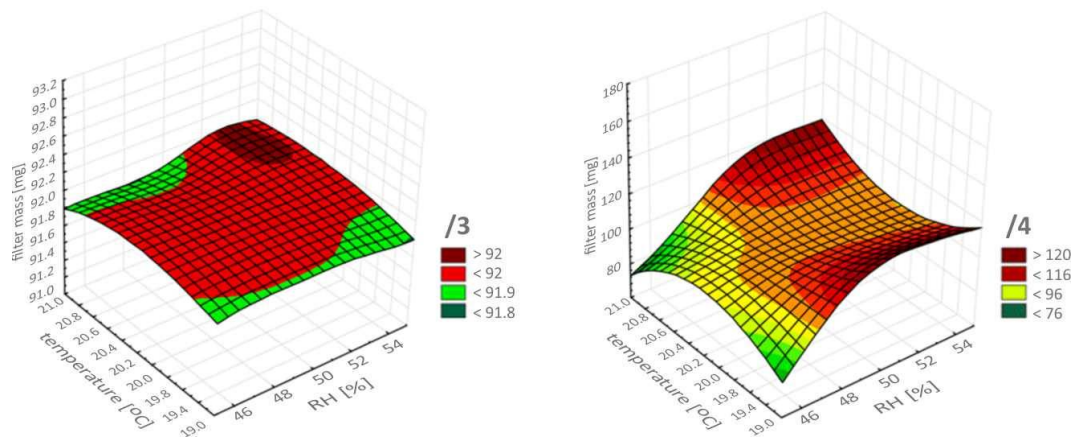
Legenda: RH – wilgotność względna (współ. przy wzroście RH o 1%)
 T – temperatura powietrza (współ. przy wzroście T o 1°C)
 PTFE – PTFE (politetrafluoroetylen), typ PM2.5 PTFE W/PP
 NL – membrana poliamidowa (nylon), typ NL 16
 Cyclopore PC – membrana poliestrowa (poliwęglan) Cyclopore™ Polycarbonate
 QMA 4.7CM 100/PK – włókno kwarcowe typu QMA 4.7CM 100/PK
 GF/A 4.7CM 100/PK – włókno szklane typu GF/A 4.7CM 100/PK

Na rysunkach 36, 37, 38 pokazano interpretację graficzną zmian masy filtrów PTFE, NL, PC, QMA, GF z uwzględnieniem zmienności warunków kondycjonowania.



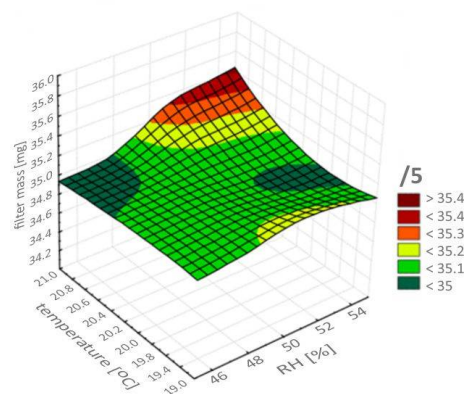
Rysunek 36. Zależność zmian masy filtrów z włókna kwarcowego /1, PTFE /2 względem zmiennych warunków kondycjonowania w zakresie wilgotności $50 \pm 5\%$ oraz temperatury $20 \pm 1^\circ\text{C}$

³ Widziewicz-Rzońca K, Janas S, Błaszczak B et al. Advancing the understanding of pm filter mass stability: unveiling the influence of humidity and temperature. Scientific Reports of Fire University. (2023);1(88):7-26. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.9741>.



Rysunek 37. Zależność zmian masy filtrów z włókna szklanego /3, nylonowych /4 względem zmiennych warunków kondycjonowania w zakresie wilgotności $50\pm 5\%$ oraz temperatury $20\pm 1^\circ\text{C}$

Najlepszą stabilność masy w zmiennych warunkach środowiskowych obserwowano dla filtrów z membrany poliestrowej (poliwęglanu). Odchylenie pomiarów masy na poziomie 0.43 mg oraz dla włókna kwarcowego, odchylenie pomiarów masy na poziomie 0.47 mg.



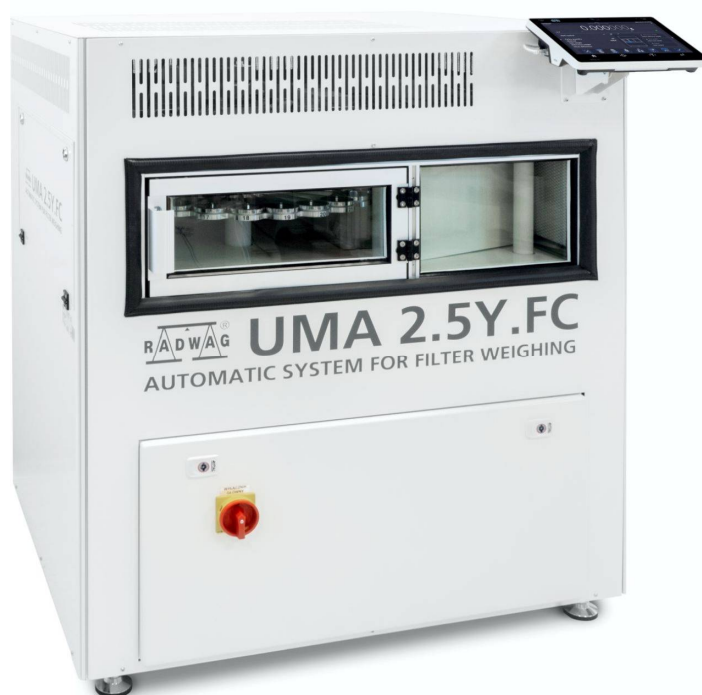
Rysunek 38. Zależność zmian masy filtrów poliwęglanowych /5, względem zmiennych warunków kondycjonowania w zakresie wilgotności $50\pm 5\%$ oraz temperatury $20\pm 1^\circ$

Przykładowo dla filtrów z włókna kwarcowego i stałej temperatury 20°C oraz wilgotności względnej 50% masa filtrów wynosi $\text{średnio } 146.01 + 0.003 \cdot 50 + 0.015 \cdot 20 = 146.01 + 0.15 + 0.3 = \mathbf{146.460 \text{ mg}}$. Przy wzroście wilgotności względnej powietrza o 5% w stałej temperaturze 20°C masa filtrów wyniesie $146.01 + 0.003 \cdot 55 + 0.015 \cdot 20 = 146.01 + 0.165 + 0.3 = \mathbf{146.475 \text{ mg}}$. Przyrost masy filtra kwarcowego wynosi zatem 0.015 mg. W tych samych warunkach temperaturowych przyrost wilgotności względnej powietrza o 5% spowoduje wzrost masy filtrów:

- PTFE o 0.93 mg (93 μg);
- z włókna szklanego o 0.09 mg (9 μg);
- z membrany poliamidowej o 11.21 mg (112 μg) a
- z membrany poliestrowej (poliwęglan) o 0.02 mg (20 μg).

Wartości współczynników kierunkowych zależności regresyjnych wskazują, że wzrost temperatury z 19°C do 21°C w przypadku filtrów z włókna kwarcowego, szklanego i poliwęglanu ma większy wpływ na precyzję pomiarów masy filtrów niż wzrost wilgotności względnej powietrza z 45% do 55%. Przyglądając się wartościom prawdopodobieństwa określonym dla współczynników kierunkowych w równaniach regresyjnych ($p < 0.05$), można stwierdzić, że błąd pochodzący od zmienności masy filtra w efekcie zmian warunków kondycjonowania może być istotny dla wyliczenia stężeń pyłu zawieszonego.

Drugim etapem badań naukowych w kierunku oceny stabilności masy filtrów jest projekt 2021/42/E/ST10/00209, ID 526286, pt. „Woda - sprawa wielkiej wagi dla niepewności pomiaru masy aerozolu”⁴. Praktyka pomiarów masy pokazuje że im większa powierzchnia ważonego obiektu, tym większy wpływ ruchu powietrza → zakłócenia, na wynik pomiaru. Jest to potwierdzone przez szereg badań własnych prowadzonych z wykorzystaniem filtrów ważonych przy zastosowaniu różnych systemów wagowych, automatycznych i manualnych. Z tego powodu w tym projekcie badawczym zastosowano system automatyczny UMA 2.5Y.FC z wbudowaną klimatyzacją, a filtry są ważone w stalowych kontenerach (rys. 31). Masa filtrów badanych zazwyczaj jest dość niska, więc dokładność pomiarów jest zależna tylko od wartości błędu losowego.

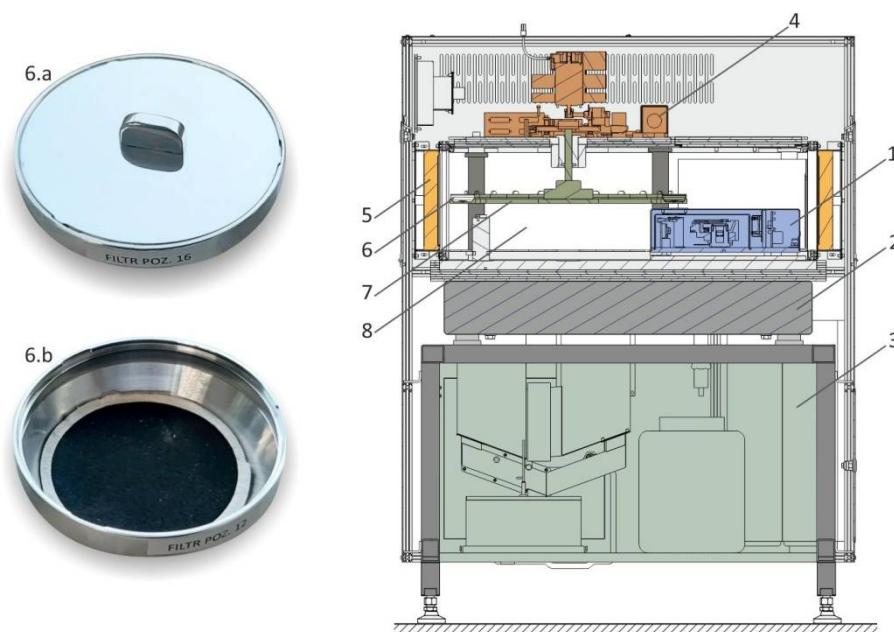


Rysunek 39. UMA 2.5Y.FC - System automatyczny do badania zmienności masy filtrów

UMA 2.5Y.FC, Maksymalne obciążenie 2g, działka elementarna $d=0.001\text{mg}$, Max ilość filtrów 24
Zgodność z EN 12341:2024, Badania w ramach projektu 2021/42/E/ST10/00209.

⁴ Chyzykov, D., Widziewicz-Rzońca, K., Błaszczak, M. et al. Automatic weighing system vs. manual weighing precision comparison in PM-loaded filter measurements under different humidity conditions. *Environ Monit Assess* 195, 1393 (2023).
<https://doi.org/10.1007/s10661-023-11939-7>

Schemat układu automatycznego UMA 2.5Y.FC pokazano na rysunku 40. Filtry zostały umieszczone w kontenerach (6.a,b), które następnie włożono do magazynu. Zadana wilgotność i temperatura jest utrzymywana wewnątrz przestrzeni wagowej (8) przez system nawilżania, który pracuje w sprzężeniu zwrotnym czujnikami warunków środowiskowych. Obrotowy ruch magazynu filtrów (7) jest uzyskiwany poprzez układ automatyki (4), który poza obrotem jest odpowiedzialny za ruch w górę i dół, jeżeli filtr znajdzie się w pozycji „ważenie”. Czystość powietrza wewnątrz komory wagowej jest zapewniona poprzez filtry Hepa (5), które znajdują się na wlocie i na wylocie powietrza z komory wagowej.



Rysunek 40. Schemat układu pomiarowego

1 – moduł wagowy (pomiar masy), 2- antywibracyjna podstawa układu pomiarowego, 3 – układ nawilżania i sterowania temperaturą, 4 – układ automatyki, 5 – filtr Hepa, 6 – kontener filtra (a – widok kontenera, b – filtr wewnątrz kontenera), 7 – magazyn filtrów, 8 – komora kondycjonowania filtrów.

Moduł wagowy (1) wraz z całą konstrukcją jest umieszczony na antywibracyjnej kamiennej podstawie (2). Cykl pomiarowy w procesie badania jest programowalny w aplikacji komputerowej, gdzie należy zdefiniować ilość cykli oraz pozycje filtrów w magazynie, których masa ma być weryfikowana. Projekt badawczy numer 2021/42/E/ST10/00209, ID 526286, pt. „ Woda - sprawa wielkiej wagi dla niepewności pomiaru masy aerozolu” jest obecnie w fazie badań, które w terminie późniejszym zostaną zaprezentowane w postaci publikacji naukowej.

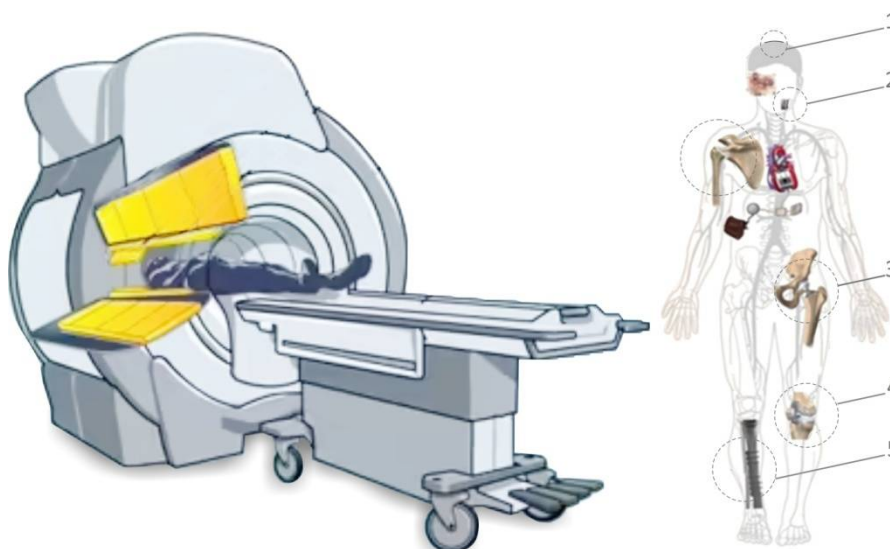
6.2. Podatność magnetyczna stopów metali używanych w implantach medycznych

Podatność magnetyczna jest jedną z podstawowych wielkości fizycznych opisujących własności magnetyczne materii. W ogólnym ujęciu jest to zdolność ośrodka do magnesowania się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Wartość ta jest wprost proporcjonalna do zawartości cząstek magnetycznych jakie występują w badanej próbce. Podatność magnetyczną (κ) określa się poprzez stosunek objętościowego namagnesowania (M) indukowanego w materiale o podatności (κ) do natężenia pola magnetycznego H , wywołującego to namagnesowanie:

$$\kappa = \frac{M}{H} \quad (10)$$

gdzie: κ - podatność magnetyczna objętościowa
 M - objętościowe namagnesowanie ośrodka [A/m]
 H - natężenie pola magnetycznego [A/m]

W zastosowaniach medycznych zbyt duża podatność magnetyczna implantów wykonanych ze stopów metali to realne niebezpieczeństwo w czasie badań wykorzystujących techniki obrazowania np. badanie metodą rezonansu magnetycznego (MRI ang. magnetic resonance imaging). Jest to jedna z podstawowych technik diagnostyki obrazowej, która w przeciwieństwie do tradycyjnej rentgenografii nie naraża organizmu na potencjalnie szkodliwe oddziaływanie promieniowania rentgenowskiego. MRI jest szczególnie przydatna do wykrywania zmian chorobowych w tkankach zwłaszcza tych osłoniętych kośćmi. Obraz w tej metodzie wytwarzany jest przez umieszczenie badanego obiektu (pacjenta) w silnym polu magnetycznym, a sam sygnał wytwarza się przez wzbudzenie próbki za pomocą fal radiowych.



Rysunek 41. Rezonans magnetyczny – implanty medyczne

1 – stainless steel 316L, Ti / Ti alloys, 2 – Co/Cr/Mo alloys, stainless steel 316L, 3 – stainless steel 316L, Co/Cr/Mo alloys, Ti / Ti alloys, 4 – stainless steel 316L, Co/Cr/Mo alloys, 5 – stainless steel 316L, Ti-Al-V alloys

Source: <https://science.howstuffworks.com/mri.htm>; <http://doi.org/10.13140/RG.2.1.3461.1921>

Jak wspomniano wcześniej badanie MRI przy zastosowaniu standardowych aparatów medycznych wiąże się z oddziaływaniem silnego pola magnetycznego na badany obiekt, $\sim 1.5T$. Dokładność i szczegółowość otrzymanego obrazu w dużej mierze zależy od natężenia pola magnetycznego wytworzonego wewnątrz ciała, im wyższe tym lepszy obraz. W związku z tym nowa generacja rezonansów pracuje już przy natężeniu około 3 T.

Jednym z niewielu przeciwwskazań do badania metodą MRI może być posiadanie przez pacjenta różnego rodzaju metalowych implantów, bądź innych urządzeń medycznych. Spowodowane jest to wysoką podatnością magnetyczną elementów metalowych, która w przypadku implantów może prowadzić do zakłóceń obrazu MRI w okolicy takiego implantu, nagrzewania się implantu w czasie badania, bądź w skrajnej sytuacji nawet do jego przemieszczenia. Obecnie na metalowe elementy implantów są stosowane głównie: stale nierdzewne, stopy CoCr, stopy tytanu oraz cyrkonu. Dobry materiał na implant powinien charakteryzować się wysoką odpornością na korozję w środowisku płynów ustrojowych człowieka, wysoką biogodnością, modułem Younga i gęstością zbliżoną do zastępowanego fragmentu kości oraz jak wynika z wcześniejszego wywodu niską podatnością magnetyczną.

Na obecnym etapie techniki metalurgicznej, najlepiej wspomniane wymagania spełniają stopy tytanu oraz cyrkonu. Stopy oparte na bazie CoCr bądź żelaza są znacznie cięższe, wykazują pewną cytotoksyczność i posiadają wysoki moduł Younga co może prowadzić w dłuższej perspektywie do osłabienia kości zgodnie z prawem Wolff'a. Są one jednak drogie w produkcji ze względu na wysokie powinowactwo do tlenu wspomnianych pierwiastków oraz bardzo wysoką temperaturą topnienia. Dodatkowo w celu obniżenia podatności magnetycznej stop powinien cechować się odpowiednią strukturą fazową, np. w przypadku Zr powinna pojawiać się faza ω -Zr.

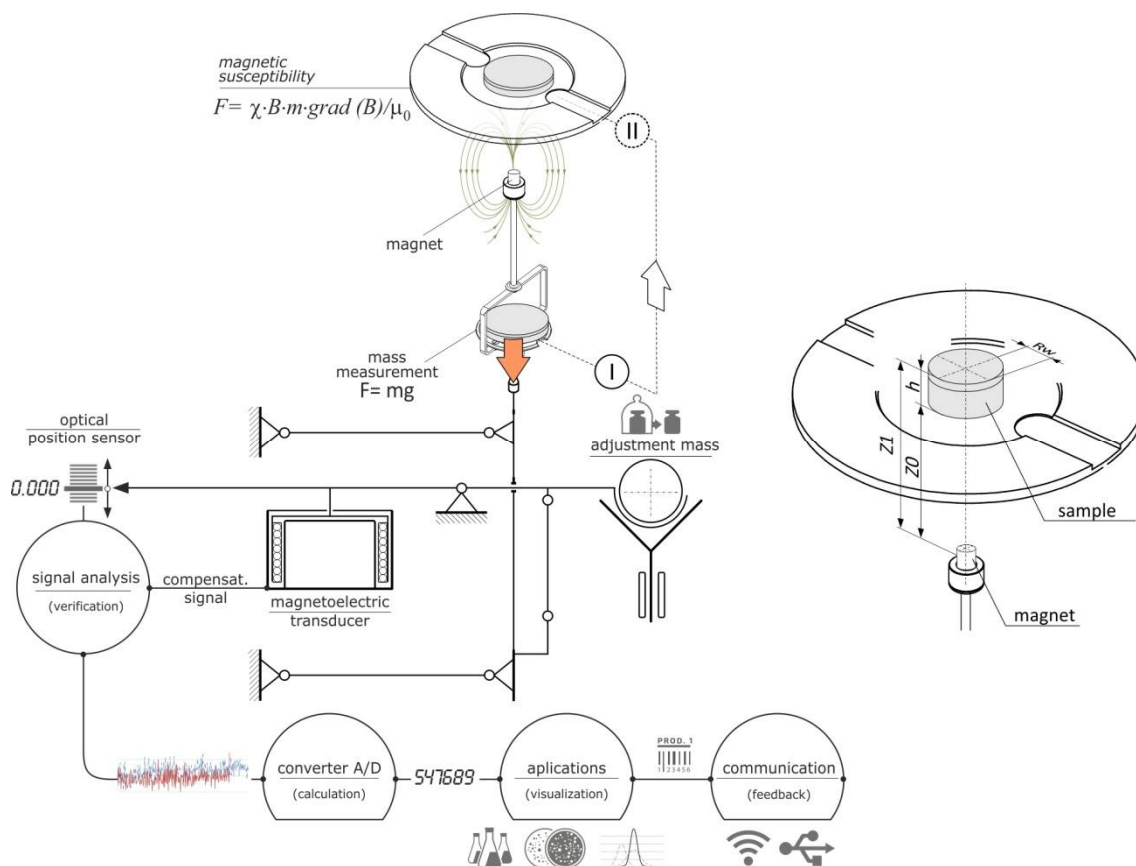
Jednym ze sposobów na obniżenie kosztów wytwarzania takich stopów jest metalurgia proszków z zastosowaniem metody SPS bądź HPHT gdzie możliwe jest formowanie wyprasek z tych metali w temperaturach poniżej 1200 °C. Takie badania są obecnie realizowane przez Wydział Metali Nieżelaznych Akademii Górniczo- Hutniczej w Krakowie.

Pomiar podatności magnetycznej substancji użytej do wytworzenia implantu medycznego można wykonać dwiema metodami, magnetometrycznie bądź wagowo. Pomiar magnetometryczny magnetometrem typu SQUID (ang. superconducting quantum interference device) polega na pomiarze namagnesowania próbki w zależności od przyłożonego pola magnetycznego. Obecnie jednym z najdokładniejszych urządzeń służących do badań własności magnetycznych materiałów jest magnetometr MPMS-SQUID-VSM. W magnetometrze tym zasadniczym elementem jest nadprzewodnikowy interferometr kwantowy (SQUID), w którym wykorzystuje się kwantową interferencję nośników prądu do wykrywania i pomiaru bardzo małych zmian indukcji magnetycznej.

W metodach wagowych mierzona jest siła z jaką przyłożone pole magnetyczne działa na próbkę → wagi Gouy'a, Faraday'a bądź Evansa. Do wzorcowania metod wagowych wykorzystuje się związki o stabilnej i dobrze znanej podatności magnetycznej takie jak: $\text{HgCo}(\text{NCS})_4$ podatność $16.44 \times 10^{-6} (\pm 0.5\%) \text{ CGS}$ w temperaturze $20 \text{ }^\circ\text{C}$ $[\text{Ni}(\text{en})_3]\text{S}_2\text{O}_3$ podatność: $1.104 \times 10^{-5} \text{ erg G}^{-2} \text{ cm}^{-3}$.

Schemat zmodyfikowanej metody wagowej w której zastosowano mikrowagę serii MYA produkcji firmy Radwag pokazano na rysunku 42. Konstrukcja układu wagowego pozwala na określenie masy badanej próbki oraz wyznaczenie jej podatności magnetycznej wg. normy OIML R111-1⁵. Przed położeniem ładunku na szalce układ pomiarowy znajduje się w położeniu równowagi. Idea pomiaru masy:

W momencie położenia ładunku na szalce (A) następuje wytrącenie czujnika położenia z jego pierwotnego stanu stabilnego w efekcie działania siły grawitacyjnej na ładunek zgodnie z zależnością $F=mg$. Układ pomiarowy dokonuje analizy sygnału pomiarowego i generuje sygnał kompensujący, celem przywrócenia układu pomiarowego do pierwotnego położenia równowagi. Adiustacja fabryczna wskaźnik przetwornika pomiarowego względem certyfikowanych wzorców masy pozwala wygenerowany sygnał kompensujący przedstawić w postaci wyniku ważenia wyrażonego w jednostkach masy, w gramach. Taka metoda pozwala na dokładne wyznaczenie masy badanej próbki, zarówno netto jak i brutto.



Rysunek 42. Schemat układu wagowego do badania podatności magnetycznej

⁵ Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1: Metrological and technical requirements

Idea pomiaru podatności magnetycznej:

Umieszczenie próbki w pozycji (B) powoduje zmianę wskazania układu pomiarowego w efekcie oddziaływania cząstek magnetycznych zawartych w strukturze próbki z polem magnesu stałego, który jest umieszczony w górnym uchwycie szalki według zależności (11).

$$F = \chi \cdot B \cdot m \cdot \text{grad}(B) / \mu_0 \quad (11)$$

Widok mikrowagi ze specjalnym uchwytem szalki oraz magnesem pokazano na rysunku 43. Pomiar podatności magnetycznej próbek o różnej strukturze może być zrealizowany zgodnie z metodyką podaną w OIML R111-1 lub też może być odniesiony do innych metod referencyjnych w których określana jest podatność magnetyczna.



Rysunek 43. Mikrowaga MYA 5.5Y – pomiar podatności magnetycznej

Mikrowaga MYA 5.5Y, Obciążenie maksymalne 5g, działka elementarna d=0.001mg, certyfikat OIML

Interfejsy: USB-A x2, USB-C, HDMI, Ethernet, Wi-Fi®, Hotspot

7. Innowacyjność jako źródło postępu technicznego

Innowacja to wszelkie działania związane z przygotowaniem i wytwarzaniem nowych lub udoskonalonych produktów, które wyraźnie wyróżniają się względem innych podobnych produktów istniejących na rynku. Innowacyjność można utożsamiać z lepszą jakością, znaczną ergonomią użytkowania, długotrwałą stabilnością, dokładnością i precyzją pomiarów, tak jak w przypadku wag serii 5Y. Przygotowanie znacznie lepszego produktu nie jest łatwe, gdyż należy znaleźć równowagę między oczekiwaniami rynku a ekonomią projektu → rentowność. Można stwierdzić, że w swojej już dość długiej historii związanej z produkcją systemów wagowych, Radwag zawsze stawiał na innowacyjność, choć w przeszłości ten termin nie był tak popularny jak obecnie. W niektórych przypadkach innowacyjność dotyczy działania i konstrukcji urządzenia, co jest widoczne i czytelne dla każdego odbiorcy, a innych zastosowaniach innowacja może być ukryta wewnątrz konstrukcji wagi dając jednak wymierne korzyści metrologiczne. Poniżej przedstawiono dwie wybrane innowacje, które są chronione patentami.

7.1. Automatyczny komparator masy, Pat. 228368

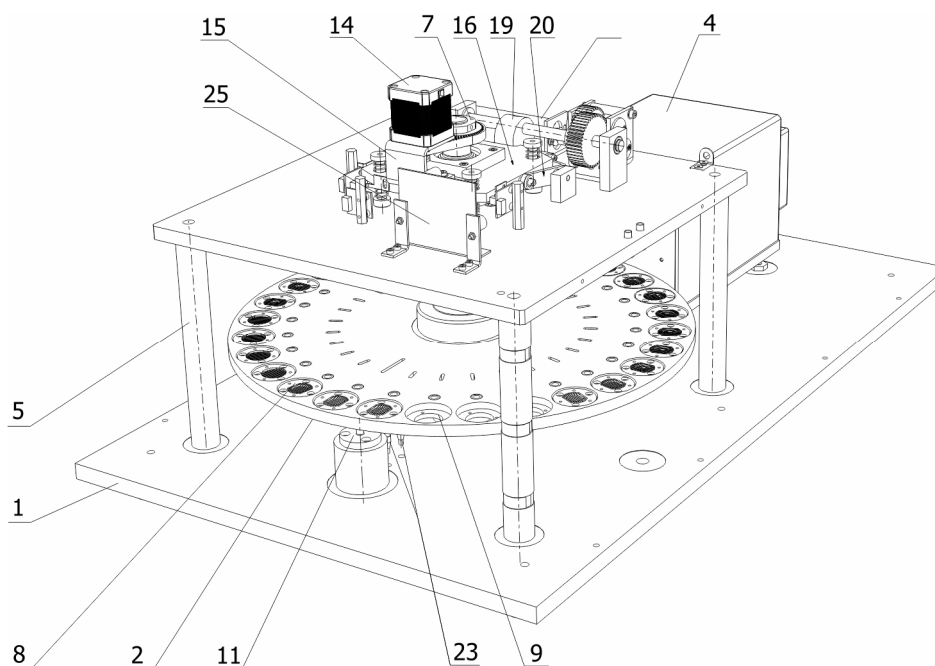
Komparacja od zawsze była czymś oczywistym, gdyż porównywano między sobą różne produkty celem wskazania podobieństw lub różnic. Historycznie ten proces był wykonywany ręcznie, ale wraz z rozwojem techniki zaczęto stosować automatyzację → wydajność. Podobne zależności występują także w metrologii pomiarów masy, zwłaszcza tam gdzie wymagana jest bardzo duża dokładność pomiaru przy zachowaniu wydajności procesu. Takim przykładem jest automatyczny komparator masy wykorzystywany porównywania między sobą wzorców masy. Radwag opracował specjalną konstrukcję tego urządzenia w którym następuje automatyczne porównywanie między sobą wzorców masy z wzorcami wyższego rzędu, rys. 44.



Rysunek 44. Komparator automatyczny serii UMA 100

UMA 100.5Y, Maksymalne obciążenie 110g, działka elementarna $d=0.001\text{mg}$, Max ilość wzorców 36

Odważniki badane jak i referencyjne są wstępnie umieszczone na podajniku komparatora (2), zbudowanym w postaci koła usytuowanego i obracanego w płaszczyźnie poziomej oraz podnoszonego przy pomocy napędu z silnikiem elektrycznym ruchu pionowego oraz przekładni z krzywką (19) na osi wyjściowej. Krzywka (19) podczas obrotu działa bezpośrednio na dźwignię (20), na której zawieszono jest koło podajnika (2), opuszczanego grawitacyjnie w płaszczyźnie pionowej w taki sposób, żeby jego pozycja kątowa w poziomie była bardzo precyzyjnie wyznaczona przy pomocy trzpienia pozycjonującego (11), co umożliwi stosowanie ożebrowanych podstawek pod odważniki (8) przejmowane przez żebra szalki wagi, przechodzące pomiędzy żebrami podstawki pod odważnik (8) podczas opuszczania koła podajnika (2).



Rysunek 45. Schemat funkcjonalny komparatora masy serii UMA

Komparator automatyczny serii UMA jest wykorzystywany w Laboratorium Pomiarowym Centrum Metrologii Badań i Certyfikacji firmy Radwag. Zastosowanie tego rozwiązania znacznie skróciło czas badań wyraźnie zwiększając dokładność pomiarów względem pomiarów wykonywanych manualnie. Proces komparacji jest uruchamiany i nadzorowany zdalnie a po zakończeniu procesu komparacji otrzymuje się raport zawierający wszystkie istotne informacje. Przykład fragmentu raportu z komparacji pokazano poniżej.

----- Komparator -----

Użytkownik AK
 Imię i nazwisko AK
 Nr raportu C/05/02/24/01/47
 Data rozpoczęcia 2024.02.05 01:47:39
 Data zakończenia 2024.02.05 02:01:21
 Wzorec badany 5 g SN:30151 GBD
 Numer zlecenia 559/24
 Numer wzorca badanego 30151
 Pozycja wzorca badanego B18
 Wzorec odniesienia 5 g E1 G0601916 SN:G0601916
 Masa 4.999955 g
 Klasa wzorca odniesienia E1
 Pozycja wzorca odniesienia A12

N	A	B	B	A	D
1	0,0000004	0,0000596	0,0000597	0,0000004	0,00005925
2	-0,0000001	0,0000594	0,0000595	-0,0000002	0,00005960
3	-0,0000007	0,0000592	0,0000592	-0,0000005	0,00005980
4	0,0000003	0,0000602	0,0000598	0,0000003	0,00005970
5	-0,0000001	0,0000595	0,0000596	-0,0000001	0,00005965
6	-0,0000005	0,0000593	0,0000593	-0,0000004	0,00005975

Średnia różnica 0,0000596250 g
 Odchylenie standardowe 0,00000020 g
 Liczba cykli 6
 Metoda ABBA
 Temperatura min 21.45 °C
 Temperatura max 21.48 °C
 Wilgotność min 33.3 %
 Wilgotność max 33.4 %
 Ciśnienie min 985.3 hPa
 Ciśnienie max 985.4 hPa

 Podpis

7.2. Mechanizm kalibracji z odważnikiem wewnętrznym dla wagi elektronicznej - Pat. 226501

Poprawne działanie każdej wagi nie jest możliwe bez okresowej adiustacji, która w ogólnym ujęciu sprawdza i koryguje czułość wagi poprzez porównanie wyniku ważenia masy adiustacyjnej z jej znaną wartością. W profesjonalnych wagach mechanizm adiustacji jest zabudowany wewnątrz konstrukcji wagi stanowiąc jej integralną część, zapewniając jednocześnie precyzję pomiaru niezależnie od warunków zewnętrznych. Konstrukcja takich układów adiustacyjnych może być chroniona prawem patentowym, tak jak w przypadku wag serii PS oraz AS produkcji firmy Radwag.



Rysunek 46. Widok wagi PS 8100.5Y.M

PS 8100.5Y.M, Maksymalne obciążenie 8100g, działka elementarna $d=0.01\text{mg}$, działka legalizacyjna $e=0,1\text{g}$
certyfikat OIML, Interfejsy: USB-A x2, USB-C, HDMI, Ethernet, Wi-Fi®, Hotspot

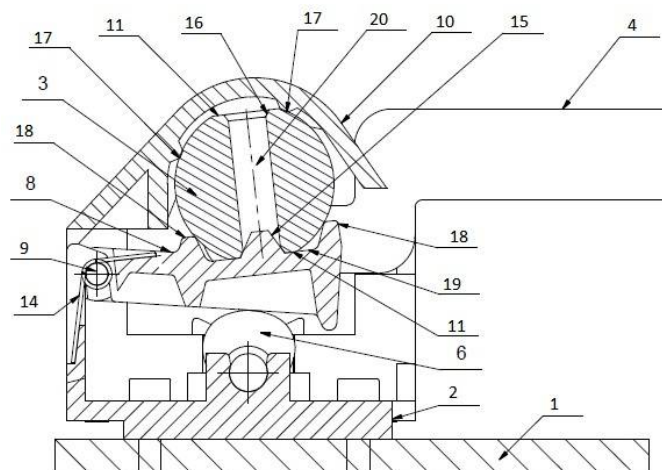
Z metrologicznego punktu widzenia masa adiustacyjna nie jest wzorcowana, tak jak jest to okresowo wykonywane dla wzorców masy. Procedura wzorcowania dotyczy wagi, jej wskazań i to jest miarą poprawności działania mechanizmu adiustacji w sensie mechanicznym, informatycznym oraz metrologicznym. Należy zauważyć, że procedury opisujące działania układu adiustacji są dość rozbudowane i są czasami wykorzystywane w połączeniu z innym mechanizmami programowymi do oceny wpływu środowiska pracy na dokładność wskazań wag → Autotest. Ma to zastosowanie w przypadku wag wysokich rozdzielczości np. mikrowagi serii MYA oraz komparatory masy.

Wielkość masy adiustacyjnej jest zmienna zależnie od maksymalnego obciążenia wagi. Poprawność działania takiego układu może być oceniana wykorzystując Autotest GLP, który wyznacza precyzję ważenia masy adiustacyjnej w cyklu automatycznym. Widok mechanizmu adiustacji wag laboratoryjnych serii PS pokazano na rysunku 47.



Rysunek 47. Mechanizm adiustacji wag serii PS w wadze z monolitycznym układem pomiarowym

W czasie produkcji i kontroli poprawność wskazań wagi jest odnoszona do certyfikowanych zewnętrznych wzorców masy. Jest to także potwierdzeniem poprawności działania adiustacji. Schemat poglądowy mechanizmu adiustacji pokazano na rysunku 48.



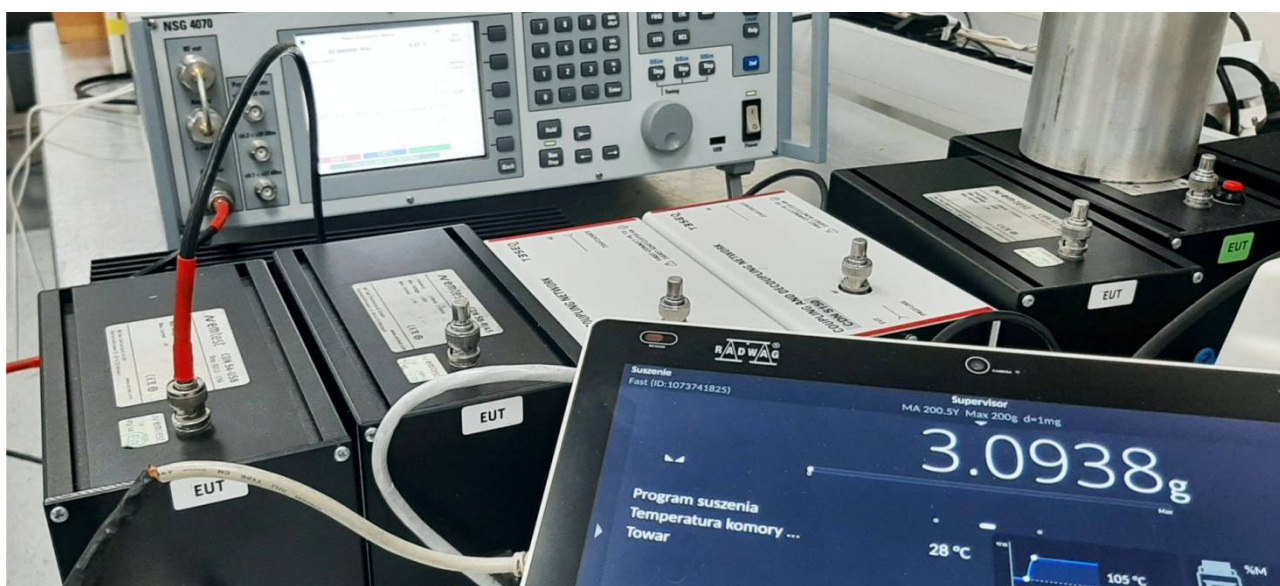
Rysunek 48. Schemat funkcjonalny mechanizmu adiustacji wag serii PS/AS

1 – podstawa wagi, 2 – obudowa układu adiustacji, 3 – masa adiustacyjna, 4 – ramię przenoszenia siły ciężkości, 6 – układ unoszenia masy adiustacyjnej, 10 – obudowa, 15,20 – pozycjonowanie masy adiustacyjnej

8. Certyfikacja systemów wagowych gwarancją jakości i niezawodności

Powtarzalna produkcja zaawansowanych technologicznie urządzeń pomiarowych, takich jak np. wagi serii XA 5Y musi przebiegać według ustalonych procesów i metod. Zakłada się przy tym że finalny produkt cechuje się wysoką jakością i dobrymi parametrami metrologicznymi. Nie jest tajemnicą, że w każdym procesie wytwarzania obserwuje się pewną dopuszczalną zmienność produkcji, która jednakże nadal gwarantuje oczekiwaną jakość produktu finalnego. Tak zbudowany i nadzorowany System Zarządzania Jakością wydaje się być optymalnym w sensie ekonomicznym (koszty) i metrologicznym (jakość). W wielu przypadkach producent jest nadzorowany poprzez okresowe audyty wykonywane przez niezależne zewnętrzne jednostki inspekcyjne. Ich zadaniem jest potwierdzić to, że proces produkcji przebiega według ustalonych procedur → bezpieczeństwo np. ATEX, które finalnie gwarantują wysoką jakość produktu → wagi, systemy wagowe, wagi dynamiczne itd.

Z drugiej strony rozwój systemów wagowych to wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań do już istniejących konstrukcji → terminal 5Y mikrowag serii MYA , lub tworzenie nowych modeli wag → np. seria X7 wag analitycznych AS. Jak wiadomo część systemów wagowych jest użytkowana w obszarze metrologii prawnej, gdzie wymagana jest certyfikacja przez Jednostkę Notyfikowaną. Wymagania prawne związane z tym procesem zawiera dokument OIML R 76-1 „ Non-automatic weighing instruments Part 1: Metrological and technical requirements – Tests”, lub norma EN 45501 „ Metrological aspects of non-automatic weighing instruments”. Uzyskanie zgodności z wymaganiami OIML (The International Organization of Legal Metrology) wymaga przeprowadzenia badań własnych → Laboratorium Badawcze, które następnie są weryfikowane przez Laboratorium Jednostki Notyfikowanej. W ramach tych badań wykonywane są testy w zakresie dokładności pomiarów masy oraz badania kompatybilności elektromagnetycznej.



Rysunek 49. Badanie kompatybilności elektromagnetycznej wagi z terminalem serii 5Y
Badanie: odporność na działanie sygnałów radiowych

Można powiedzieć że certyfikacja nie jest obowiązkiem, ale jest z pewnością obiektywnym potwierdzeniem wysokiej jakości produkowanych wag i systemów wagowych. Takie podejście jest standardem w firmie Radwag, która swoje produkty certyfikuje w europejskich jednostkach np. Czech Metrology Institute (CMI), GUM (Główny Urząd Miar), historycznie w Nederlands Meet Institute (NMI), ale także poza obszarem Unii Europejskiej, np. Brazylia, Maroko, Chiny, USA, itd.

Testy jakie realizuje Laboratorium Badawcze firmy Radwag są wykorzystywane nie tylko w zakresie certyfikacji wag, ale przede wszystkim stanowią informację w jakim zakresie należy prowadzić modyfikacje, żeby osiągnąć jeszcze lepszą jakość i ergonomię produkowanych wag. Finalnie wartością mierzoną zawsze jest pomiar masy, ale z konstrukcyjnego punktu widzenia istotne są także inne czynniki, takie jak stabilność w czasie, odporność na czynniki zewnętrzne, sygnalizacja zmian warunków zewnętrznych itd. Całość tych zagadnień podlega weryfikacji oraz okresowej re-certyfikacji, gdy zmiany są istotne, tak jak w przypadku wag serii X2, gdzie wprowadzono znacznie większy wyświetlacz wagi, rys. 50.



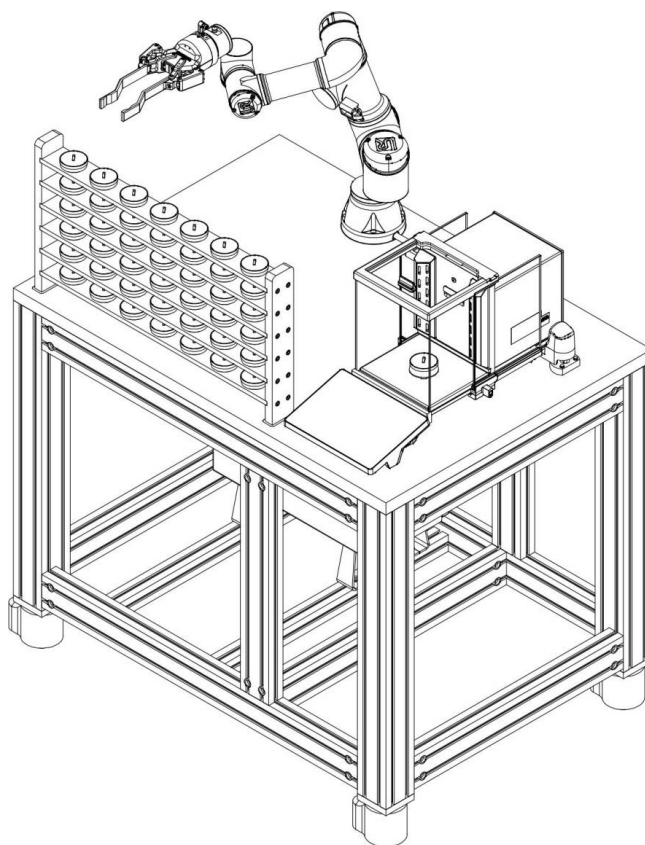
Rysunek 50. Waga PS 8100.X7.M – wprowadzenie większego (7") wyświetlacza wagi

PS 8100.X.M, Maksymalne obciążenie 8100g, działka elementarna $d=0.01\text{mg}$, działka legalizacyjna $e=0,1\text{g}$
Wyświetlacz typu touch-screan, certyfikat OIML, Interfejsy: USB-A $\times 2$, Ethernet, Wi-Fi®, Hotspot

9. Cobot w pomiarach masy

Automatyzację w pomiarach masy można zrealizować na kilka sposobów, ale zazwyczaj jest to rozwiązanie dedykowane dla konkretnego celu w zakresie wydajności, ergonomii, dokładności pomiaru pracujące w płaszczyźnie X-Y-Z → system robotyczny RMC 1000.5Y. Jest to idealne rozwiązanie, gdy pozycje badanych obiektów są stałe w zdefiniowanej przestrzeni. Należy zauważyć, że zawsze przestrzeń robocza jest wyizolowana w taki sposób żeby nie było możliwości ingerencji operatora → bezpieczeństwo.

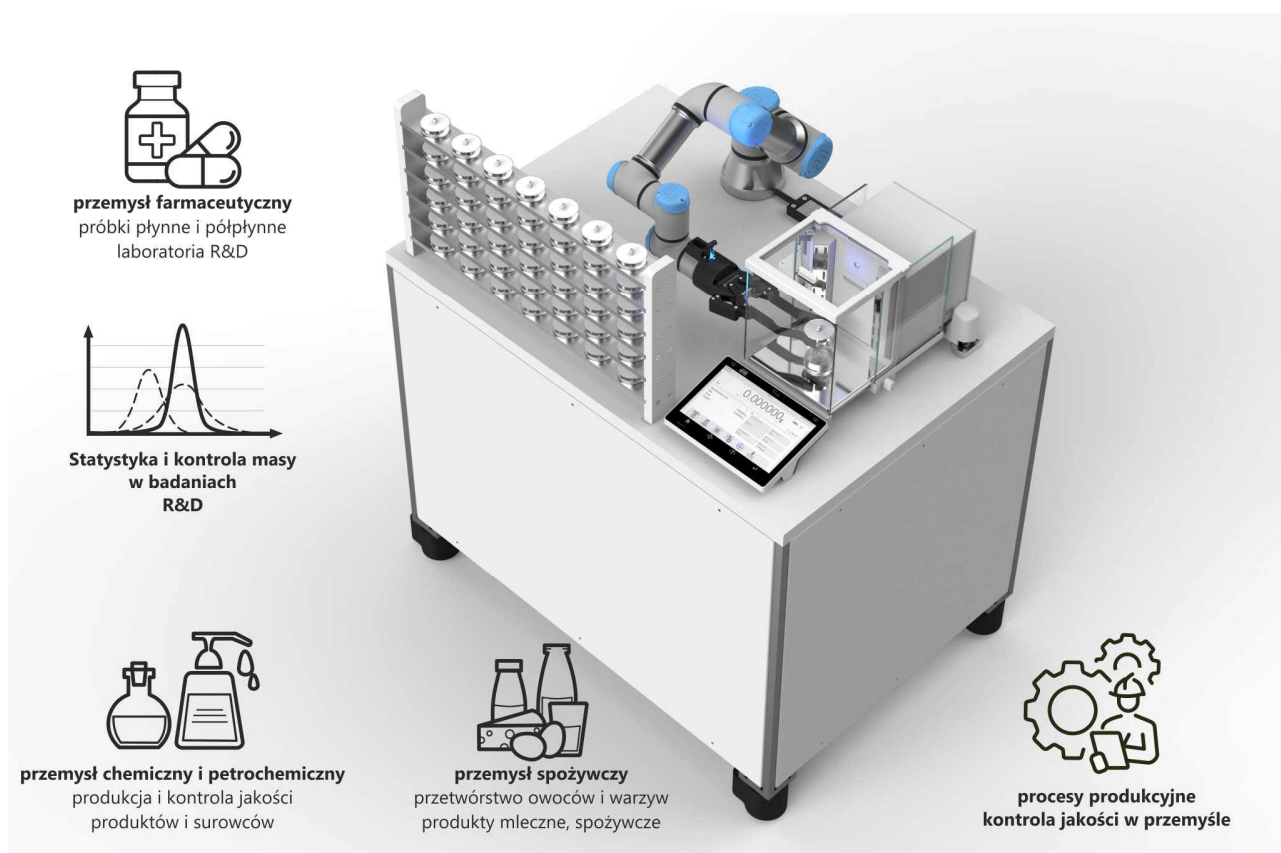
Praktycznie nieograniczoną swobodę w zakresie przemieszczania badanych obiektów uzyskuje się przy zastosowaniu robotycznego ramienia „Cobot - collaborative robot”, który ma za zadanie współpracować z operatorem w sposób bezpieczny i efektywny. W tym przypadku środowisko pracy może być współdzielone między operatorem i cobota w zdefiniowanym zakresie. Przykład cobota zainstalowanego na stanowisku pracy wagi przedstawiono na rysunku 51.



Rysunek 51. Układ robotyczny „cobot” w pomiarach masy

Obecnie w firmie Radwag rozpoczęto prace badawcze których celem jest wskazanie tych obszarów związanych z pomiarami masy w których możliwe jest wykorzystanie układów automatycznych serii Cobot.

Praktyka wskazuje, że zastosowanie układów pomiarowych sprzężonych z Cobotem jest możliwe w dość szerokim zakresie, ale każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie. Dotyczy to kształtu przenoszonego obiektu, jego masy oraz algorytmu działania Cobota.



Rysunek 52. Obszary zastosowania Cobota w pomiarach masy

10. Kontrola metrologiczna wag i systemów wagowych

Nie ma żadnych wątpliwości że z metrologicznego i normatywnego⁶ punktu widzenia każde urządzenie pomiarowe, w tym także waga powinno być okresowo sprawdzane zgodnie z przyjętym harmonogramem. W przypadku wag taka procedura jest realizowana za pomocą jednego lub kilku wzorców masy i polega na porównaniu wskazania wagi ze znaną certyfikowaną wartością wzorca. Zazwyczaj wyznaczona jest dopuszczalna tolerancja +/- w jakiej powinien znaleźć się wynik ważenia wzorca.

⁶ ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, EN ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements)

Podczas kontroli metrologicznej wykorzystywane są wzorce masy do oceny dokładności pomiaru → błąd systematyczny. Jest to podejście normatywne zalecane przez OIML w odniesieniu do wszystkich wag nieautomatycznych. Należy zauważyć, że w rzeczywistości pomiar masy dokonywany jest dla zupełnie innych obiektów niż wzorce stalowe. Z tego powodu można przypuszczać, że dokładność pomiaru będzie inna, zwłaszcza gdy ważony obiekt ma znacznie większą powierzchnię → filtr.



Rysunek 53. Kontrola metrologiczna wagi nieautomatycznej

Układy automatyczne zdecydowanie różnią się konstrukcją względem typowych wag obsługiwanych manualnie. W niektórych przypadkach podczas okresowej kontroli nie ma możliwości wykorzystania typowych wzorców masy ze względu na kształt szalki lub lokalizację modułu wagowego. W takich przypadkach należy wykorzystywać dedykowane wzorce masy o kształtach dopasowanych do konstrukcji szalki układu wagowego, tak jak w przypadku RB 2.5Y.



Rysunek 54. Układ automatyczny RB 2.5Y – wzorec masy oraz magazyn filtrów

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Łańcuch spójności pomiarowej.....	6
Rysunek 2. Komparator AKM 2.20.5Y,d= 0,1 mg.....	7
Rysunek 3. Komparator próżniowy AVK 1000.5Y.....	8
Rysunek 4. Konstrukcja komparatora próżniowego AVK-1000.....	9
Rysunek 5. Manualny komparator masy serii WAY.....	10
Rysunek 6. Aplikacja Digital Weighing Auditor.....	11
Rysunek 7. Komparator masy RMC 1000.5Y.....	12
Rysunek 8. RMC 1000.5Y - odważniki w procesie dyseminacji.....	15
Rysunek 9. NANO-Komparator AK/4-500.5Y.....	16
Rysunek 10. Waga PS 1000.R2 – pomiar masy farb i lakierów.....	18
Rysunek 11. Dział Kontroli Jakości – waga AS 220.R2, ocena poprawności wskazań.....	19
Rysunek 12. Poprawność (trueness) i precyzja (precision) w pomiarach masy.....	20
Rysunek 13. Badanie zmian masy filtra po procesie sączenia (oczyszczalnia ścieków),.....	20
Rysunek 14. Mikrowaga MYA 5.5Y z aktywną Funkcją MSW.....	21
Rysunek 15. Mikrowaga MYA 2.4Y – odważanie porcji proszku.....	22
Rysunek 16. Systemy wagowe z przetwarzaniem elektromagnetycznym.....	23
Rysunek 17. Ogólna zasada działania adiustacji wagi elektronicznej.....	23
Rysunek 18. Widok masy adiustacyjnej systemu wagowego mikrowagi serii MYA oraz wagi analitycznej serii XA.....	24
Rysunek 19. Autotest – waga XA 82/220.5Y.....	25
Rysunek 20. Ogólna zasada działania wagi z przetwornikiem magnetoelektrycznym.....	26
Rysunek 21. Źródła błędów w pomiarach masy.....	27
Rysunek 22. Waga XA 82/220.5Y, pomiar masy filtra, Mikrowaga MYA 2.5Y, pomiar masy kapsułki.....	27
Rysunek 23. Waga XA 210.5Y.A z dodatkowym czujnikiem warunków środowiskowych.....	28
Rysunek 24. Czujnik warunków środowiskowych THB-Pro.....	28
Rysunek 25. Mikrowaga MYA 21.5Y – błąd losowy i systematyczny w pomiarach mikro.....	29
Rysunek 26. Waga automatyczna DWM 7500.....	30
Rysunek 27. Kontrola objętości pipet jednokanałowych.....	31
Rysunek 28. System automatyczny AP-12.1.5Y.....	32
Rysunek 29. RB 2.5Y – kondycjonowanie i pomiar masy filtrów.....	33
Rysunek 30. Hamowania podwoziowa oraz układ automatyczny do pomiaru masy filtrów.....	34
Rysunek 31. Kontener filtrów.....	34
Rysunek 32. RMC 2.5Y.FC – pomiar masy filtrów w cyklu automatycznym.....	35
Rysunek 33. Schemat metody badania ilości pyłu zawieszonego wg. EN 12341:2024.....	36
Rysunek 34. Schemat pobornika.....	37
Rysunek 35. Proces weryfikacji i ważenia filtra – układ robotyczny RB 2.4Y.....	38
Rysunek 36. Zależność zmian masy filtrów z włókna kwarcowego /1, PFTE /2 względem zmiennych warunków kondycjonowania ..	39
Rysunek 37. Zależność zmian masy filtrów z włókna szklanego /3, nylonowych /4 względem zmiennych war. kondycjonowania	40
Rysunek 38. Zależność zmian masy filtrów poliwęglanowych /5, względem zmiennych warunków kondycjonowania	40
Rysunek 39. UMA 2.5Y.FC - System automatyczny do badania zmienności masy filtrów	41
Rysunek 40. Schemat układu pomiarowego	42
Rysunek 41. Rezonans magnetyczny – implanty medyczne.....	43
Rysunek 42. Schemat układu wagowego do badania podatności magnetycznej.....	45
Rysunek 43. Mikrowaga MYA 5.5Y – pomiar podatności magnetycznej.....	46
Rysunek 44. Komparator automatyczny serii UMA 100.....	47
Rysunek 45. Schemat funkcjonalny komparatora masy serii UMA.....	48
Rysunek 46. Widok wagi PS 8100.5Y.M.....	50
Rysunek 47. Mechanizm adiustacji wag serii PS w wadze z monolitycznym układem pomiarowym.....	51
Rysunek 48. Schemat funkcjonalny mechanizmu adiustacji wag serii PS/AS	51
Rysunek 49. Badanie kompatybilności elektromagnetycznej wagi z terminalem serii 5Y	52
Rysunek 50. Waga PS 8100.X7.M – wprowadzenie większego (7”) wyświetlacza wagi	53
Rysunek 51. Układ robotyczny „cobot” w pomiarach masy.....	54
Rysunek 52. Obszary zastosowania Cobota w pomiarach masy.....	55
Rysunek 53. Kontrola metrologiczna wagi nieautomatycznej.....	56
Rysunek 54. Układ automatyczny RB 2.5Y – wzorzec masy oraz magazyn filtrów.....	56

SPIS TABEL

Tabela 1. Parametry metrologiczne komparatora AVK-1000.5Y	8
Tabela 2. Maksymalne dopuszczalne błędy dla odważników ($\pm \delta m$ w mg).....	10
Tabela 3. Temperatura otoczenia podczas wzorcowania odważników.....	11
Tabela 4. Parametry metrologiczne komparatora RMC 1000.5Y.....	13
Tabela 5. Precyzja pomiaru komparatora RMC 1000.5Y.....	14
Tabela 6. OIML R111-1, Maksymalne dopuszczalne błędy dla odważników ($\pm \delta m$ w mg).....	17
Tabela 7. Precyzja pomiarów masy komparatora NANO.AK-4.500.5Y dla różnych obciążeń testowych.....	17
Tabela 8. Minimalne wartości MSW zależnie od wartości działki elementarnej wagi.....	21



Radwag Wagi Elektroniczne

26-600 Radom, ul. Toruńska 5,

Tel. 48 48 3848800, fax 48 48 3850010

e-mail: radom@radwag.pl, <http://www.radwag.com>

