

STANOWISKO DO KALIBRACJI URZĄDZEŃ DO POMIARU WILGOTNOŚCI MATERIAŁÓW SYPKICH TRANSPORTOWANYCH ZA POMOCĄ PODAJNIKÓW ŚLIMAKOWYCH

Jan WEGEHAUPT¹, Karol JABŁOŃSKI²

1. Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Instytut Automatyki, ZPSS
tel.: (32) 237 25 18 e-mail: jan.wegehaupt@polsl.pl
2. Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, Instytut Automatyki, ZPSS
tel.: (32) 237 23 76 e-mail: karol.jablonski@polsl.pl

Streszczenie: Jedną z wykorzystywanych w przemyśle metod transportu materiałów sypkich jest transport oparty o podajniki ślimakowe. Metoda ta wykorzystywana jest głównie podczas podawania materiałów w miejsca o ograniczonym dostępie oraz trudnych warunkach. Transport oparty na podajnikach ślimakowych posiada wiele zalet, ale wilgotność transportowanego materiału w znaczący sposób może wpływać na jego przebieg. Obecnie nie istnieją uniwersalne urządzenia do pomiaru wilgotności materiałów sypkich, przez co konieczne jest prowadzenie szybkiej, a zarazem dokładnej kalibracji obecnie dostępnych urządzeń pomiarowych. Niniejszy artykuł przedstawia budowę stanowiska kalibracyjnego oraz zasadę procesu kalibracji urządzeń do pomiaru wilgotności materiałów sypkich transportowanych z wykorzystaniem podajników ślimakowych. Przedstawiane w artykule stanowisko kalibracyjne znajduje szerokie zastosowanie w pracach naukowych oraz dydaktycznych.

Słowa kluczowe: pomiar wilgotności, podajnik ślimakowy, stanowisko do kalibracji, materiały sypkie.

1. WPROWADZENIE

Pomiar wilgotności materiałów sypkich pełni istotną rolę w wielu dziedzinach przemysłu. Obecność wody ma wpływ na możliwości ich przechowywania, wytrzymałość, wybór metody transportu, a także może decydować o sposobie dalszej obróbki. Odpowiedni poziom wilgotności materiału stanowiącego produkt końcowy danego procesu technologicznego często stanowi bardzo ważne kryterium jego jakości i określa możliwość jego dalszego wykorzystania [1].

Powszechną metodą transportu materiałów sypkich jest użycie podajnika ślimakowego (inaczej: przenośnika śrubowego). Pozwala on na bezpieczny transport materiału oraz dostarczanie go bezpośrednio do odpowiednich urządzeń przemysłowych (komory mielenia, komory spalania, komory reaktorów chemicznych, itp.). Transport oparty o podajniki posiada jednak wadę bezpośrednio związaną z zawartością wody w materiale sypkim. W wyniku zbyt wysokiej wilgotności surowca może dojść do jego „sprasowania”, powodującego całkowite zablokowanie ślimaka [2]. W przypadku zastosowań przemysłowych może prowadzić to do konieczności zatrzymania całego procesu produkcyjnego. Wilgotność materiału sypkiego ma więc kluczowe znaczenie w

kontekście jego transportu, a kontrolowanie jej wartości ma wymiar ekonomiczny.

Obecnie na rynku można znaleźć urządzenia pozwalające na pomiar z różną dokładnością wilgotności materiałów sypkich transportowanych przenośnikiem śrubowym. Cechą wspólną tych układów jest konieczność ich kalibracji, wynikająca bezpośrednio z fizycznych podstaw ich funkcjonowania. W większości przypadków zjawiska te powiązane są z rodzajem badanego materiału sypkiego oraz parametrami pracy podajników ślimakowych. Obecnie nie istnieją uniwersalne metody pomiaru, co oznacza, że procedura kalibracji urządzeń pomiarowych do wyznaczania wilgotności materiałów sypkich transportowanych w przenośnikach śrubowych odgrywa bardzo duże znaczenie [3].

2. WILGOTNOŚĆ MATERIAŁÓW SYPKICH

2.1. Podział i specyficzne cechy materiałów sypkich

Wspólną cechą wszystkich materiałów sypkich, stanowiących ponad połowę wszystkich materiałów wykorzystywanych gospodarczo [1] jest strukturalny układ ciała stałe-gaz (zazwyczaj powietrze). Ilościowe proporcje tych dwóch faz zależą w znacznej mierze od wymagań wynikających z realizowanego procesu. W zastosowaniach przemysłowych powyższy dwufazowy układ praktycznie nie występuje. Jest to bezpośrednio związane z występowaniem wilgoci w powietrzu atmosferycznym, w związku z czym w rzeczywistości powstaje układ trójfazowy: ciało stałe-ciecz-gaz. Z uwagi na właściwości adsorpcyjne wody, cechuje się on dużym zróżnicowaniem właściwości i dużą liczbą czynników wpływających na jego makroskopową charakterystykę.

Unikalność materiałów sypkich oraz ciągle rosnąca ilość operacji technologicznych z ich udziałem doprowadziły do konieczności opracowywania nowych rozwiązań w dziedzinie techniki i teorii materiałów sypkich. Projektowanie wykorzystujących je procesów technologicznych wymaga dokładnej znajomości właściwości fizycznych wykorzystwanego materiału oraz jego zachowań w kontakcie z innymi substancjami. Szczególnie duże znaczenie mają metody pomiaru właściwości materiałów sypkich, które bezpośrednio wpływają na ich właściwości.

Własności fizyczno-mechaniczne materiału sypkiego będącego ośrodkiem niejednorodnym zależą przede wszystkim

kim od czynników strukturalnych: granulacji i kształtu cząstek, porowatości złoza oraz od cieczy wypełniającej przestrzenie pomiędzy ziarnami [4].

W większości przypadków przemysłowych cieczą wypełniającą przestrzenie międzyciarnowe jest woda. Ma ona bezpośredni wpływ na cechy fizyczno-mechaniczne materiałów sypkich, w szczególności na wytrzymałość, właściwości sprężyste, siły adhezji, współczynniki tarcia zewnętrznego i wewnętrznego, zdolność płynięcia materiału i wiele innych.

Występowanie wody w materiale sypkim określa się w sposób ilościowy jako jego wilgotność. Wilgotność materiału jest różnie definiowana. Najczęściej stosowana jest wilgotność masowa (bezwzględna), zdefiniowana zgodnie z BN-72/0520-08 jako stosunek masy wody zawartej w materiale do masy materiału suchego [5]:

$$W_{\text{bezwzględna}} = \frac{m_w}{m_0} \cdot 100\% = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie: $W_{\text{bezwzględna}}$ – wilgotność masowa (bezwzględna),

m – masa materiału wilgotnego,

m_w – masa wody zawartej w materiale,

m_0 – masa materiału suchego.

Masa wody m_w oznacza jedynie ilość wody zawartej w materiale, która jest związana z nim fizykochemicznie (np. siłami adhezji), nie oznacza natomiast wody związanej chemicznie. W związku z tym masę wody m_w określa się najczęściej jako różnicę między masą próbki wilgotnej m i masą tej samej próbki po wysuszeniu do stałej masy w odpowiednio dobranej temperaturze m_0 . Dobór odpowiedniej temperatury pozwala zapobiec wydzielaniu się wody krystalizacyjnej, która powstaje w wyniku częściowego rozkładu materiału.

3. STANOWISKO DO KALIBRACJI

3.1. Budowa stanowiska pomiarowego

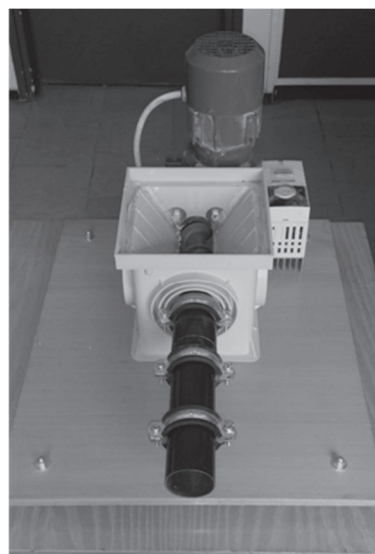
Zaprojektowane stanowisko pomiarowe (rys. 1) powstało w oparciu o 4-biegunowy silnik trójfazowy firmy BESEL S.A., podłączony do przekładni napędzającej podajnik ślimakowy o średnicy 50 mm. Przenośnik został wyposażony w zbiornik na badany materiał z możliwością zwiększenia jego objętości. Ślimak podajnika porusza się w rurze wykonanej w sposób umożliwiający na jej szybką wymianę oraz montaż kalibrowanych urządzeń pomiarowych. Konstrukcja urządzenia pozwala na umieszczenie urządzeń pomiarowych bezpośrednio pod śrubą jak również za jej końcem. Podajnik sterowany jest za pomocą podłączonego do silnika falownika SV004iG5A-1 firmy LS Industrial Systems.

System pomiarowy został oparty o mikrokontroler wyposażony w zewnętrzne przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe pozwalające na sterowanie i akwizycję danych z różnych urządzeń pomiarowych. Komunikacja pomiędzy mikrokontrolerem a peryferiami realizowana jest za pośrednictwem magistrali I²C umożliwiającej łatwą rozbudowę układu pomiarowego o dodatkowe moduły.

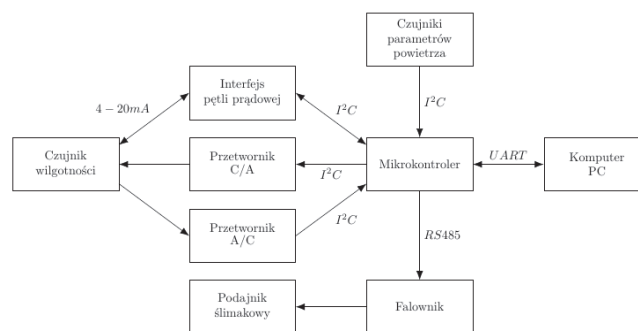
Układ został wyposażony również w konwerter pozwalający na komunikację z kalibrowanymi urządzeniami za pośrednictwem pętli prądowej 4-20 mA. Rozwiązanie to pozwala na kalibrację praktycznie każdego przemysłowego urządzenia do pomiaru wilgotności materiałów sypkich.

Równoległe z pomiarami sygnałów z kalibrowanych urządzeń prowadzone są pomiary parametrów powietrza,

które mają bezpośredni wpływ na wartość wilgotności przepływającej W_p materiału wykorzystywanego podczas procesu kalibracji [6].



Rys. 1. Stanowisko do kalibracji urządzeń do pomiaru wilgotności materiałów sypkich transportowanych za pomocą podajników ślimakowych



Rys. 2. Schemat układu pomiarowego i systemu sterowania

System posiada także możliwość bezpośredniego sterowania falownikiem wykorzystywanym do kontroli prędkości obrotowej podajnika ślimakowego. Rozwiązanie to pozwala na utrzymywanie stałej prędkości podajnika ślimakowego, a co za tym idzie zapewnienie stałych warunków dla wszystkich badanych urządzeń pomiarowych.

3.3. Oprogramowanie do kalibracji

Oprogramowanie komputerowe służące do automatyzacji procesu kalibracji posiada dwa główne moduły, pozwalające na prowadzenie identyfikacji charakterystyki badanych urządzeń pomiarowych do pomiaru wilgotności materiałów sypkich oraz umożliwiającą akwizycję danych pomiarowych z czujnika wilgotności i wstępną analizę zebranych danych.

Moduł do identyfikacji charakterystyk urządzeń pomiarowych pozwala na import danych z pliku CSV, oraz na odczyt danych pomiarowych pozyskanych bezpośrednio z urządzenia pomiarowego. Moduł automatycznie przelicza dane na odpowiednie jednostki i wizualizuje je na wykresie. Prosty interfejs użytkownika pozwala na szybką zmianę konfiguracji parametrów obliczeniowych.

W aplikacji została zaimplementowana możliwość wyznaczania wartości współczynników modelu wielomianowego opisującego charakterystyki badanych urządzeń pomia-

rowych. Dodatkowo użytkownik ma możliwość stosowania dodatkowych filtrów pozwalających na poprawę kształtu charakterystyki badanego urządzenia.

Oprogramowanie pozwala także na predefiniowanie procedur kalibracyjnych. Oznacza to, że możliwe jest określenie czasu trwania procesu kalibracji oraz prędkości obrotowej podajnika ślimakowego. Dodatkowo możliwe jest zdefiniowanie skokowych zmian prędkości obrotowej podajnika ślimakowego co pozwala na badanie jej wpływu na mierzone wartości.

4. PROCES KALIBRACJI W OPARCIU O ZBUDOWANE STANOWISKO KALIBRACYJNE

4.1. Przygotowanie referencyjnych materiałów sypkich

Kalibracja urządzenia do pomiaru wilgotności materiałów sypkich polega na wyznaczeniu charakterystyki kalibracyjnej dla wybranego materiału sypkiego. W celu wyznaczenia tej charakterystyki konieczne jest wykonanie kalibrowanym urządzeniem serii pomiarów wybranego materiału sypkiego o znanej wilgotności. Ilość punktów kalibracyjnych dobierana jest w zależności od zakresu pomiarowego i dokładności pomiarowej kalibrowanego urządzenia.

Przygotowanie wzorcowej próbki materiału do kalibracji urządzenia w pojedynczym punkcie kalibracyjnym sprowadza się do przygotowania kilograma suchego materiału sypkiego. Wilgotność tego materiału sprawdzana jest w oparciu o metodę termogravimetryczną. Metoda ta określa wilgotność w oparciu o ubytek masy, który występuje podczas ogrzewania substancji. W metodach termogravimetrii podczas ogrzewania próbki ulatniają się składniki takie jak: tłuszcze, substancje aromatyczne, rozpuszczalniki organiczne, dodatki chemiczne, woda oraz inne składniki, które mogą powstać w wyniku rozkładu termicznego. Tak więc wilgotność materiałów wyznaczana tą metodą to zbiór wszystkich składników występujących w próbce, które wyparowują podczas procesu jej ogrzewania. Niestety, wykorzystując metodę termogravimetrii nie ma możliwości selekcjonowania ubytku czystej wody od ubytku innych składników. Kluczowe znaczenie w tym procesie ma jednak temperatura suszenia. Dobór odpowiedniej temperatury pozwala bowiem zapobiec zjawisku spalania badanej próbki, a tym samym ubytkowi innych substancji, jak również wydzielaniu wody krystalizacyjnej, która powstaje w wyniku częściowego rozkładu materiału.

Pomiar wilgotności (zawartości masy suchej) wykonywany za pomocą wagosuszarki jest pomiarem różnicowym, w wyniku którego otrzymujemy wartość wilgotności względnej:

$$W_{względna} = \frac{m_w}{m} \cdot 100\% = \frac{m - m_0}{m} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie: $W_{względna}$ – wilgotność masowa (względna),

m – masa materiału wilgotnego,

m_w – masa wody zawartej w materiale,

m_0 – masa materiału suchego.

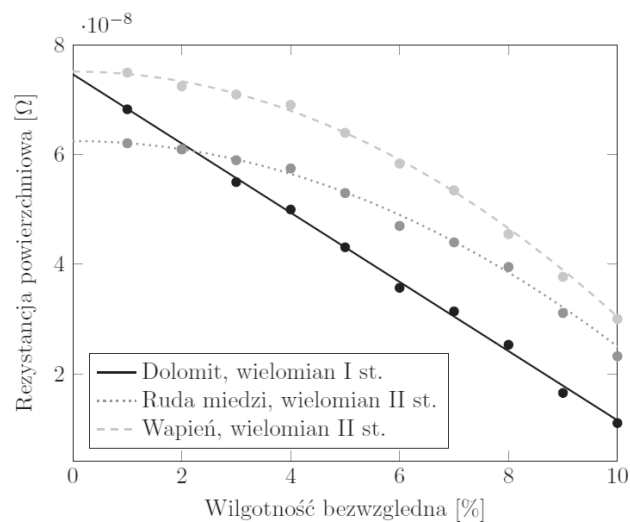
Przygotowany suchy materiał sypki miesza się z odważoną, zgodnie ze wzorem (1) ilością wody a następnie umieszcza w hermetycznie szczelnym pojemniku. Z przygotowanego materiału pobiera się trzy próbki o masie około 5 gram, które służą do weryfikacji za pomocą metody termogravimetrycznej, uzyskanej wilgotności materiału sypkiego.

4.2. Wyznaczenie charakterystyki badanego urządzenia pomiarowego

Po przygotowaniu materiału sypkiego o znanej wilgotności materiał zostaje umieszczony w zasobniku, z którego za pomocą podajnika ślimakowego jest zabierany, a następnie transportowany w rurze z kalibrowanymi urządzeniami pomiarowymi. Podczas transportu materiału prowadzona jest akwizycja mierzonych wielkości, które następnie zostają poddane procesowi analizy z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania do estymacji parametrów charakterystyki kalibracyjnej.

W wyniku procesu kalibracji otrzymywane są charakterystyki kalibracyjne wybranego urządzenia pomiarowego dla badanych materiałów sypkich. Opisywane stanowisko kalibracyjne wykorzystane zostało m.in. do kalibracji prototypów urządzeń pomiarowych opartych o zjawisko zmiany rezystancji powierzchniowej badanego materiału mierzonej w oparciu o czteroprzewodowy pomiar rezystancji [7]. Do badań wykorzystano dwa zestawy podwójnych podłużnych elektrod o długości 40 mm i szerokości 1,5 mm ułożonych równolegle i oddalonych od siebie o 10 mm. Podczas procedury kalibracyjnej równolegle wyznaczano charakterystyki kalibracyjne dla prototypów umieszczonych bezpośrednio pod powierzchnią ślimaka oraz po za obszarem jego pracy [2].

Poprzez zastosowanie przedstawionego stanowiska kalibracyjnego osiągnięto dokładność pomiarową kalibrowanych urządzeń pomiarowych rzędu 0,2% dla zestawu podłużnych elektrod pomiarowych oraz 0,35% dla zestawu okrągłych elektrod pomiarowych [2]. Na rysunku 4 zaprezentowano wyznaczone charakterystyki kalibracyjne dla kalibrowanego prototypu urządzenia pomiarowego.



Rys. 4. Charakterystyki kalibracyjne urządzenia do pomiaru wilgotności materiałów sypkich opartego o zjawisko zmiany rezystancji powierzchniowej dla elektrod umieszczonych pod powierzchnią podajnika ślimakowego wyznaczone za pomocą opracowanego stanowiska kalibracyjnego.

5. POMIARY PARAMETRÓW POWIETRZA

5.1. Podstawy teoretyczne

Ze względu na fakt, iż parametry fizyczne powietrza mogą mieć wpływ na wartość wilgotności przemijającej referencyjnego materiału sypkiego, system wyposażono w układ sensorów umożliwiających pomiary higrometrycz-

ne. Pomiarom bezpośrednim podlegają następujące wielkości:

- temperatura termometru suchego,
- ciśnienie atmosferyczne,
- wilgotność względna powietrza.

Ponadto, za ich pośrednictwem wyznaczane są również następujące parametry, trudniejsze do zmierzenia czujnikami elektrycznymi w sposób bezpośredni:

- wilgotność bezwzględna [7] - stężenie masowe pary wodnej w powietrzu, czyli masa pary wodnej przypadająca na daną jednostkę objętości powietrza,
- zawartość wilgoci - masa pary wodnej na jednostkę masy suchego powietrza,
- temperatura termometru mokrego [8] - najniższa temperatura, do której przy danej wilgotności i ciśnieniu atmosferycznym można ochłodzić ciało przy pomocy parowania,
- temperatura punktu rosy - temperatura, w jakiej powietrze osiąga stan nasycenia parą wodną.

Znajomość powyższych pomiarów umożliwi w toku dalszych badań sprawdzenie ich wpływu na wyniki pomiarów wilgotności materiału sypkiego proponowaną metodą, a następnie, w razie konieczności, implementację odpowiednich algorytmów kompensacji zwiększających dokładność.

5.2. Wykorzystane czujniki

Do pomiaru wilgotności i temperatury postanowiono wykorzystać zintegrowany czujnik mierzący oba te parametry jednocześnie. W celu mierzenia ciśnienia atmosferycznego, znajomość wartości którego jest niezbędna do obliczania pozostałych parametrów, wykorzystano zintegrowany czujnik wykonany w technologii MEMS. Oba układy zasilane są napięciem 5V i komunikują się z jednostką sterującą przy użyciu interfejsu I2C.

Tabela 1: Parametry użytych czujników

Wielkość	Czujnik	Zakres	Dokładność
Temperatura	GE ChipCap2	-40 ÷ 125 °C	±0.3 °C
Wilgotność	GE ChipCap2	0 ÷ 100 %RH	±2 %RH
Cięśnienie	FS MPL115A2	50 ÷ 115 kPa	±1 kPa

6. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszym artykule stanowisko kalibracyjne urządzeń do pomiaru wilgotności materiałów sypkich pozwala na prowadzenie zautomatyzowanego procesu kalibracji opartego na wyznaczaniu krzywych kalibracyjnych. Rozwiązanie to stanowi odpowiedź na potrzebę przyspieszenia procesu kalibracji nowych urządzeń do pomiaru wilgotności materiałów sypkich transportowanych w podajnikach ślimakowych.

Zbudowane stanowisko kalibracyjne znajduje szerokie zastosowanie podczas kalibracji prototypów urządzeń pomiarowych oraz podczas zajęć dydaktycznych. W ramach zajęć dydaktycznych studenci wykorzystują przedstawione stanowisko do zapoznania się z zasadami prowadzenia procedur kalibracyjnych oraz wpływu czynników zewnętrznych na dokładność prowadzonej procedury.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Opaliński I.: Inżynieria materiałów sypkich: Wybrane zagadnienia. Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza, Rzeszów, 2014.
2. Wegehaupt J., Buchczik D.: Moisture measurement of bulk materials in an electromagnetic mill, 18th International Carpathian Control Conference, 2017
3. Wąsowicz S., Wyrwich M.: Pomiar wilgotności materiałów sypkich. 3 różne metody, PodKontrolą maj, 2/2014
4. Jaeger H. M., Nagel S. R., Behringer R. P.: Granular solids, liquids, and gases. Reviews of Modern Physics, 68(4), 1996.
5. Norma branżowa BN-72/0520-08.
6. Gruszczyński D., Wodziński P.: Wilgotność i tarcie w materiałach ziarnistych a proces przesiewania. Fizykochemiczne Problemy Metalurgii, 29: 183-198, 1995.
7. Lisowski M.: Pomiary rezystywności i przenikalności elektrycznej dielektryków stałych. ISBN 83-7085-800-7. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004
8. Piotrowski J.: Pomiary, czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego. Warszawa : WNT, 2013.
9. Stull R.: Wet bulb temperature from relative humidity and air temperature. Journal of Applied Meteorology and Climatology. 2011, vol. 50, no 11, s. 2267-2269.

CALIBRATION STAND OF DEVICES FOR MEASURING THE MOISTURE OF BULK MATERIALS TRANSPORTED BY SCREW FEEDER

One of the methods used in the industry to transport bulk materials is transport based on screw feeders. This method is mainly used when supplying materials in restricted areas and difficult conditions. Transport based on screw feeders has many advantages, but the moisture content of transported material can significantly affect the transport process. At present, there are no universal devices for measuring the moisture content of bulk materials. It is now necessary to conduct accurate and time-consuming calibration of measuring instruments.

This article presents the construction of a calibration station and the principle of fast calibration process for moisture content measurement of bulk materials. The calibration station presented in the article has been used in the work on the development of a prototype of a device for measuring the moisture content of bulk materials based on the measurement of changes in surface resistance. Quick and accurate calibration has saved time and achieved satisfactory measurement accuracy, which has become the basis for continuing work on the development of calibrated measuring equipment.

Keywords: humidity measurement, screw feeder, calibration stand, bulk materials.