

ZASTOSOWANIE SPEKTROMETRII IMPEDANCYJNEJ DO POMIARU WILGOTNOŚCI ZIARNA ZBÓŻ

Dariusz Tomkiewicz

Katedra Systemów Sterowania, Politechnika Koszalińska

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę pomiaru wilgotności ziarna zbóż z zastosowaniem spektrometrii impedancyjnej. Dzięki swoim właściwościom układ pomiarowy bazujący na tej metodzie pomiarowej może zostać zastosowany do pomiaru on-line wymaganego przez systemy automatycznego sterowania urządzeń suszarniczych. Opracowano funkcję opisującą zależność pomiędzy wilgotnością ziarna a modulem impedancji i temperaturą ziarna. Układ pomiarowy umożliwia oszacowanie wilgotności z dokładnością do 1,6% wilgotności ziarna zboża.

Słowa kluczowe: wilgotność ziarna, pomiar on-line, spektrometria impedancyjna

Wprowadzenie

Wilgotność ziarna zbóż jest jednym z najważniejszych parametrów decydujących o ich przydatności do długotrwałego przechowywania. Gdy mamy do czynienia z układami automatycznego sterowania procesem suszenia ziarna oraz procesem monitorowania jego jakości podczas przechowywania konieczne jest użycie metody pomiarowej, która umożliwiałaby pomiar tej wielkości w sposób ciągły.

Układ do ciągłego pomiaru wilgotności ziarna współpracujący z układem automatyki powinien zapewniać: wystarczająco mały błąd pomiarowy, powinien być odporny na długotrwałe przebywanie w atmosferze której wilgotność dochodzi do 100% i panuje duże zapylenie, układ także powinien działać przez wiele miesięcy bez konieczności obsługi przez operatora, być odporny na działanie wysokich temperatur, umożliwiać przesyłanie informacji o wilgotności materiału do innych elementów układu sterowania. Ważnym wymogiem jest zapewnienie pracy w czasie rzeczywistym (tzn. czas przetwarzania danych na podstawie których estymowana jest wilgotność materiału powinien być dużo mniejszy niż czas zmiany wilgotności materiału podczas procesu). Ostatnim wymaganiem jakie jest stawiane przed czujnikiem wilgotności jest jego cena, która powinna zapewniać jego dostępność dla użytkownika [Tomkiewicz 2000].

Pomiar wilgotności jest trudny w przypadku ośrodków takich jak ziarna zbóż. Wynika to z różnorodności wiązań wody w tych ośrodkach, różnorodności mechanizmów ruchu wody a także złożonej budowy wewnętrznej ziarniaka. W szczególności czynnikami utrudniającymi pomiar zawartości wody w ziarnie są: budowa i skład chemiczny badanego materiału, stan mechaniczny, zawartość elektrolitów, temperatura materiału suszonego, kolor, obecność pyłów rozpraszających promieniowanie elektromagnetyczne, tekstura

powierzchni, oraz rozkład wody w materiale. W materiałach o takiej budowie, woda w miarę upływu czasu przenika przez kolejne warstwy materiału zmieniając jego właściwości fizyczne.

Istnieje wiele metod pomiaru wilgotności w ciałach stałych. Jednak w warunkach przemysłowych do najczęściej stosowanych należy zaliczyć metody elektryczne polegające na pomiarze rezystancji lub pojemności elektrycznej próbki wilgotnego materiału. Metody pomiarowe wykorzystujące właściwości elektryczne materiału charakteryzują się jednak dużą niedokładnością. Do zalet tych metod można zaliczyć odporność na działanie warunków środowiska. Ponadto cena układu pomiarowego jest względnie niska. Drugim rodzajem metod coraz częściej stosowanych również w warunkach przemysłowych są metody radiometryczne. Polegają one na pomiarze tłumienia wybranego pasma lub pasm częstotliwości fali elektromagnetycznej przechodzącej lub odbitej od próbki badanego materiału. Najczęściej do tego celu wykorzystywane jest promieniowanie w zakresie bliskiej podczerwieni NIR (near infrared). Niestety metody radiometryczne są trudne do wykorzystania w warunkach przemysłowych gdzie występuje duże zapylenie. Ponadto charakteryzują się one wysoką ceną zakupu.

Cel badań

Taniami i odpornymi na warunki przemysłowe metodami pomiarowymi są metody zaliczające się do metod elektrycznych. Niestety pomiar z zastosowaniem tych metod jest obarczony dużym błędem. Konieczne jest zatem prowadzenie badań związanych z poprawą dokładności tych metod oraz możliwością zastosowania ich w układach automatyki gdzie wymagany jest ciągły pomiar wilgotności.

Jedną z metod, którą możemy zaliczyć do metod elektrycznych jest powszechnie stosowana np. w medycynie metoda, o nazwie spektrometria impedancyjna. Spektrometria impedancyjna polega na pomiarze impedancji (1) badanego obiektu

$$Z = R + j X \quad (1)$$

gdzie:

$$j = \sqrt{-1},$$

R – rezystancja materiału,

X – reaktancja materiału,

Z – impedancja materiału.

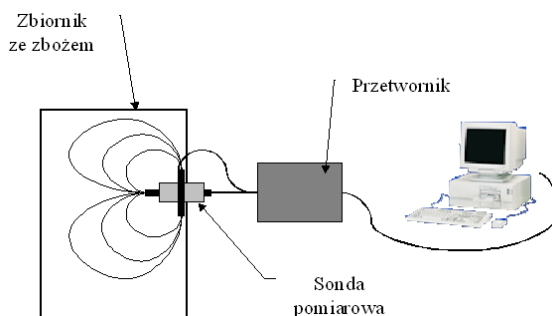
W przypadku gdy mierzony obiekt posiada właściwości charakterystyczne dla czynnej rezystancji (reaktancji), jego impedancja będzie zmieniała się wraz z ze zmianą częstotliwości napięcia przyłożonego do mierzonego obiektu. Badania polegające na pomiarze zmian impedancji obiektu dla wybranego zakresu częstotliwości nazywamy spektrometrią impedancyjną [Chanet i in. 1999].

Głównym celem badań było sprawdzenie czy istnieje możliwość zastosowania spektrometrii impedancyjnej do oceny wilgotności ziarna zbóż. Dodatkowo w trakcie badań sprawdzono dokładność pomiaru wilgotności przy zastosowaniu pomiaru modułu impedancji dla wybranej częstotliwości sygnału.

Metodyka

Obiektem badań było ziarno pszenicy. Podczas doświadczeń używano próbki pochodzące z tej samej partii materiału. Przed doświadczeniami ziarno było nawilżane. Po nawilżeniu ziarno było przechowywane przez jedną dobę w celu wyrównania wilgotności. Zboże nawilżono do wilgotności 14%, 18%, 19% i 21% wilgotności względnej. Dodatkowo w celu sprawdzenia zależności do temperatury dla każdej wartości wilgotności dokonywano pomiaru dla trzech lub czterech wartości temperatury ziarna. Temperatury dla których przeprowadzano doświadczenia zawierały się w przedziale od 19°C do 44°C.

Dla każdej wartości temperatury i wilgotności dokonywano pomiaru impedancji dla pięciuset wartości częstotliwości sygnału pomiarowego z zakresu od 100 Hz do 100 kHz. Pomiar powtarzano pięciokrotnie w tych samych warunkach. Po każdym pomiarze pobierano próbkę ziarna i dokonywano pomiaru wilgotności metodą suszarkową. Układ pomiaru wilgotności zboża przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Układ pomiarowy

Fig. 1. Measuring system

Układ pomiarowy składa się ze zbiornika z ziarnem zboża w którym umieszczono sondę pomiarową. Sondę pomiarową zbudowano z dwóch elektrod umieszczonych w odległości 10 cm. od siebie. Wewnątrz sondy umieszczono czujnik temperatury typu PT100. Elektrody były podłączone do przetwornika pomiarowego firmy Analog Devices EVAL-AD5933EB. Przetwornik pomiarowy generował sygnał napięciowy, który przechodził przez warstwę ziarna. Sygnał był generowany w postaci cyfrowej i miał postać sinusoidy o zmiennej częstotliwości. Układ pomiarowy umożliwiał określenie częstotliwości początkowej sygnału, kroku przyrostu częstotliwości i liczby kroków przyrostu częstotliwości. Następnie sygnał był przetwarzany do postaci analogowej. W części analogowej była możliwa zmiana wzmocnienia sygnału. Dzięki temu był możliwy wybór zakresu zmian napięcia sygnału. Sygnał po przejściu przez warstwę ziarna był wzmocniany, podlegał filtracji dolnoprzepustowej a następnie po przetworzeniu go do postaci cyfrowej był poddawany szybkiej transformacji Fouriera (FFT). W efekcie otrzymywano wartość impedancji w postaci liczby zespolonej. Do analizy wykorzystano dwa wektory liczb opisujące część rzeczywistą i urojoną impedancji dla każdego kroku przyrostu częstotliwości sygnału pomiarowego. Na podstawie tych wartości obliczono moduł impedancji wyrażony zależnością (2).

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2)$$

Przetwornik ten komunikował się z komputerem poprzez złącze USB. Czujnik temperatury był podłączony do przetwornika rezystancja – napięcie a następnie do karty pomiarowej PCL-818HG firmy Advantech.

Na komputerze znajdowało się oprogramowanie umożliwiające sterowanie parametrami układu pomiarowego oraz rejestrację danych uzyskanych podczas pomiaru.

Kolejne etapy badań związanych z przetwarzaniem sygnału oraz opracowywaniem danych były wykonywane w środowisku MATLAB.

Estymacja wilgotności ziarna

Podczas badań założono, że impedancja zboża jest funkcją następujących wielkości:

- napięcia sygnału wymuszającego,
- zakresu skanowanej częstotliwości,
- wilgotności ziarna,
- temperatury ziarna.

W pierwszym etapie badań sprawdzono wpływ zmiany wartości napięcia sygnału pomiarowego na wrażliwość pomiaru impedancji. Dokonano pomiaru impedancji dla czterech wartości napięcia międzyszczytowego: 0,2V, 0,4V, 1V i 2V. Pomiarów dokonano dla zakresu częstotliwości od 0,1 kHz do 100 kHz z krokiem 200 Hz. Stwierdzono, że dla napięcia sygnału pomiarowego o wartości 2V zmiana modułu impedancji w całym badanym zakresie częstotliwości jest największa.

Następnym krokiem było dokonanie wyboru częstotliwości sygnału pomiarowego. Na podstawie danych uzyskanych z doświadczeń dla takiej samej temperatury ziarna. Zastosowano w tym celu funkcje wrażliwości opisaną równaniem (3).

$$w = \frac{\Delta |Z(f)|}{\Delta M} \quad (3)$$

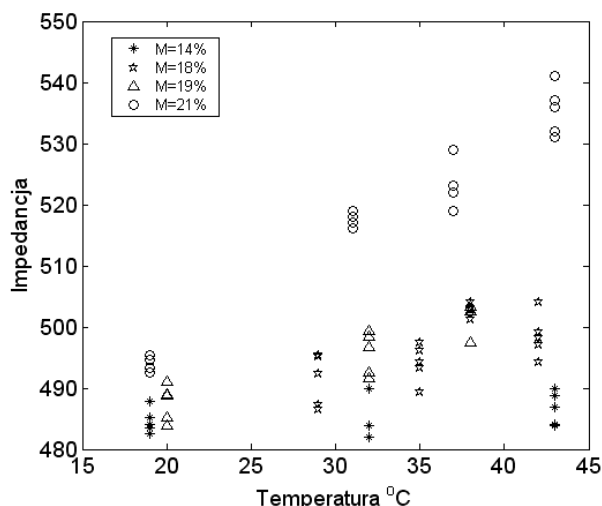
gdzie:

- f – częstotliwość sygnału pomiarowego,
- ΔM – przyrost wilgotności materiału,
- $\Delta |Z(f)|$ – przyrost wartości modułu impedancji.

Funkcja (3) określała w jaki sposób przyrost wilgotności materiału wpływa na zmianę modułu impedancji. Na podstawie funkcji wrażliwości stwierdzono, że wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału wrażliwość pomiaru była coraz większa. Maksimum osiągnęła dla najwyższej częstotliwości jaka była badana czyli dla 100kHz.

Podobne badania przeprowadzono w celu sprawdzenia wpływu zmiany częstotliwości sygnału na wzrost odchylenia standardowego modułu impedancji. Stwierdzono mały wpływ częstotliwości sygnału, natomiast wartość odchylenia standardowego w bardzo mocny sposób zależała od zakłóceń elektromagnetycznych (obecności w pobliżu stanowiska pomiarowego włączonych urządzeń elektrycznych).

Po wstępnych badaniach przeprowadzono doświadczenia związane z opisem matematycznym zależności pomiędzy modulem impedancji, temperaturą i wilgotnością materiału. W tym celu dokonano doświadczeń w których zmierzono impedancje materiału o różnych wilgotnościach i temperaturze. Wyniki zostały przedstawione na rysunku 2.



Rys. 2. Wyniki uzyskane podczas doświadczeń wartość modułu impedancji w funkcji temperatury
 Fig. 2. Results obtained during experiments - impedance modulus value in function of temperature

Następnym krokiem było określenie struktury matematycznej modelu opisującego zależność pomiędzy modulem impedancji, temperaturą ziarna i jego wilgotnością. Na podstawie analizy danych pomiarowych zastosowano model wielomianowy. Liczbę członów w równaniu zwiększano dopóki różnica pomiędzy danymi z pomiarów i estymowanymi z modelu nie wykazała właściwości białego szumu.

$$M - \hat{M} = \varepsilon \quad (4)$$

gdzie:

- M – wilgotność materiału,
- \hat{M} – wilgotność materiału estymowana z modelu,
- ε – zakłócenia stochastyczne o postaci białego szumu.

Uzyskano w ten sposób model opisany równaniem (5)

$$M = a_3 T + a_2 |Z| + a_1 |Z|^{a_4} + a_0 + \varepsilon \quad (5)$$

gdzie:

- a_4, a_3, a_2, a_1, a_0 – parametry modelu,
- T – temperatura ziarna.

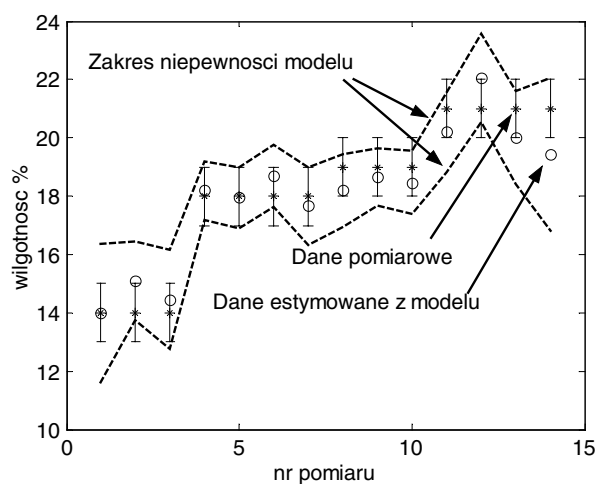
Model matematyczny ma formę równania nieliniowego. Nieliniowość modelu wynika z zastosowania parametru a_4 , który jest wykładnikiem potęgi, którego postawą jest moduł impedancji. Parametry modelu zostały estymowane z zastosowaniem nieliniowej metody Nelder-Meada. Jako funkcję celu zastosowano kwadrat różnicy pomiędzy zmierzonymi wartościami wilgotności ziarna a wartościami estymowanymi. Jednak zastosowanie tego modelu bezpośrednio do estymacji wilgotności ziarna powodowało, że różnica pomiędzy wartością estymowaną a zmierzoną sięgała 14%. Po przeprowadzeniu analizy resztek modelu stwierdzono, że przyczyną tak dużego błędu jest duża wariancja danych wejściowych a szczególnie wartości modułu impedancji.

Odchylenie standardowe wartości modułu impedancji ograniczono stosując do obliczeń wartość średnią z pięciu pomiarów które były przeprowadzone dla każdej partii materiału. Zastosowany układ elektroniczny umożliwia wielokrotne powtarzanie pomiarów w bardzo krótkim czasie (np. zwiększenie liczby pomiarów do 200 zwiększyło czas pomiarów o około jedną sekundę). Zastosowanie wielokrotnego pomiaru modułu impedancji dla tej samej partii materiału spowodowało, że odchylenie standardowe miało wartość

$$\sigma(\bar{Z}) = \frac{\sigma(Z)}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

gdzie:

n – ilość pomiarów, i jest zależne od pierwiastka z liczby pomiarów.



Rys. 3. Wyniki estymacji wilgotności ziarna z zastosowaniem równania 7

Fig. 3. Results of grain moisture content estimation using equation 7

W modelu zastosowany został wykładnik potęgi obliczony wcześniej przy użyciu metody Nelder-Meada. Tym samym model miał już charakter liniowy i można było zastosować liniowe metody estymacji jego parametrów.

Ze względu na to, że przyjęto, że dane wejściowe są obciążone zakłóceniami stochastycznymi, których odchylenie standardowe obliczono z równania (6) zastosowano metodę ważonych najmniejszych kwadratów do estymacji parametrów modelu (7). W metodzie jako współczynniki wag użyto wariancji obliczonej z równania (6) [Mańczak i in. 1983].

$$\hat{M} = a_3 T + a_2 |Z| + a_1 |Z|^{0,34} + a_0 \quad (7)$$

Po procesie estymacji parametrów, zastosowano model (7) do estymacji wilgotności ziarna. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 3. Następnie obliczono niepewność pomiarową jaką obarczone są wyniki uzyskane z modelu. Do tego celu użyto równania (8). Przedział w którym zawarta jest wartość wilgotności ziarna z prawdopodobieństwem 0,98 również przedstawiona jest na rysunku (3).

$$M = \hat{M} \pm \text{diag}(t_{\alpha,s} \hat{\sigma} \sqrt{X (X^T V X)^{-1} X^T}) \quad (8)$$

gdzie:

- V – macierz wag,
- X – macierz pomiarowa,
- $\hat{\sigma}$ – estymowane odchylenie standardowe resztek modelu,
- $t_{\alpha,s}$ – współczynnik rozkładu t – Studenta dla prawdopodobieństwa równego 0,98.

Maksymalny błąd oszacowania wilgotności ziarna liczony na podstawie różnicy pomiędzy wartością średnią z danych zmierzonych i wartościami obliczonymi z modelu wynosił 1,56%.

Wnioski

Zastosowane spektrometrii rezystancyjnej umożliwia estymację zawartości wody w ziarnie. Układ pomiarowy bazujący na tej metodzie pomiarowej nie zawiera łatwych do uszkodzenia elementów ruchomych i umożliwia jego zastosowanie w trudnych warunkach panujących w suszarniach i silosach do przechowywania zboża. Podczas badań stwierdzono na podstawie przeprowadzonych doświadczeń, że do pomiaru wilgotności na poziomie dokładności 1,6% wilgotności względnej wystarczający jest pomiar modułu impedancji tylko dla jednej częstotliwości sygnału. Jest to możliwe pod warunkiem zastosowania opisującej zmiany impedancji spowodowane przez zmiany temperatury oraz zastosowania pięciokrotnych powtórzeń pomiarów.

Bibliografia

- Chanet M., Riviere C., Eynard P. 1999. Electric impedance spectrometry for the control of manufacturing process of comminuted meat products. *Journal of Food Engineering* 42,153-159.
- Mańczak K., Nahorski Zb. 1983. Komputerowa identyfikacja obiektów dynamicznych. PWN. Warszawa.
- Tomkiewicz D. 2000. Inteligentny układ pomiaru wilgotności ziarna zbóż dla celów sterowania procesem suszenia. Praca doktorska, Politechnika Koszalińska.

USING IMPEDANCE SPECTROMETRY TO MEASURE CORN GRAIN MOISTURE CONTENT

Summary. The paper presents a method applied to measure corn grain moisture content using impedance spectrometry. Owing to its properties, the measuring system based on this measurement method may be used for the on-line measurement required by automatic control systems for dehydration/drying equipment. The researchers developed a function describing the relation between grain moisture content and impedance modulus and grain temperature. Measuring system allows to estimate moisture content value with accuracy up to 1.6% of corn grain moisture content.

Key words: grain moisture content, on-line measurement, impedance spectrometry

Adres do korespondencji:

Dariusz Tomkiewicz; e-mail dariusz.tomkiewicz@tu.koszalin.pl
Katedra Systemów Sterowania
Politechnika Koszalińska
ul Raławika 15
75-620 Koszalin