

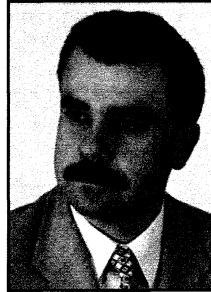
Andrzej WILCZEK , Wojciech SKIERUCHA
 INSTYTUT AGROFIZYKI PAN, LUBLIN

Częstotliwościowa metoda pomiaru zespolonej przenikalności dielektrycznej materiałów porowatych przy zastosowaniu sond o różnej długości

Mgr Andrzej WILCZEK

Andrzej Wilczek urodził się w 1972 r. w Lublinie. Tytuł magistra fizyki uzyskał w 1998 r. po ukończeniu studiów na Uniwersytecie Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie. Od 2003 r. pracuje w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, na stanowisku fizyka. Jego zainteresowania koncentrują się na rozwoju czujników, metod pomiaru oraz aparatury pomiarowej do badania właściwości fizyko-chemicznych materiałów porowatych, szczególnie właściwości dielektrycznych gleby.

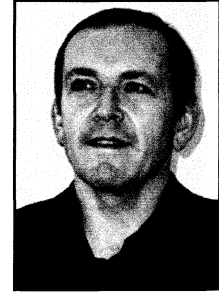
e-mail: awilczek@demeter.ipan.lublin.pl



Dr hab. inż. Wojciech SKIERUCHA

Wojciech Skierucha urodził się w 1956 r. w Lublinie. Tytuł magistra inżyniera elektronika uzyskał w 1980 r. po ukończeniu studiów w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Od 1985 r. pracuje w Instytucie Agrofizyki PAN w Lublinie, obecnie na stanowisku docenta. Jego zainteresowania koncentrują się na rozwoju czujników i systemów monitorowania wielkości fizyko-chemicznych w zastosowaniu do wielofazowych materiałów porowatych, takich jak gleba.

e-mail: w.skierucha@demeter.ipan.lublin.pl



Streszczenie

Celem pracy jest porównanie dwóch metod pomiaru zespolonej przenikalności dielektrycznej gleby. W pierwszej metodzie wykorzystywanej do pomiarów referencyjnych użyta została sonda Open-Ended. W drugiej metodzie do pomiarów zostały wykorzystane sondy dwuprętowe o różnej długości, przy pomocy których dokonywano pomiaru przenikalności dielektrycznej w tak dobranych częstotliwościach, aby można je było traktować jako elementy o parametrach skupionych. W pracy przedstawiono kalibrację sond dwuprętowych metoda używaną do kalibracji sond Open-Ended. Polega ona na pomiarach sond w stanach zwarcia, rozwarcia i po umieszczeniu ich w ośrodku o znanych właściwościach dielektrycznych. Po kalibracji dokonano pomiarów parametrów odbiciowych na próbkach trzech gleb w wybranych częstotliwościach. Wszystkie pomiary wykonywane były wektorowym analizatorem sieci pracującym w zakresie częstotliwości 20 kHz ÷ 8 GHz. Obiektami badanymi były trzy gleby o różnym rozkładzie granulometrycznym oraz wilgotności. Ze względu na specyfikę pomiaru w pracy przedstawiono analizę dla jednej tylko gleby. Porównanie wyników pozwala sądzić, że stosowane metody wykazują się wysoką korelacją wyników w przypadku pomiarów obu składowych zespolonej przenikalności dielektrycznej

Słowa kluczowe: właściwości gleby, zespolona przenikalność dielektryczna, sonda Open-Ended, sonda dwuprętowa

Frequency method for the measurement of the porous materials complex dielectric permittivity using probes of different length

Abstract

The aim of the study is comparison of two measurement methods of the complex dielectric permittivity of soils. The first one used an Open-Ended probe and it was a reference method. The other one used two-rod probes of different length. These probes measured reflection parameters soils in selected frequencies that enabled to treat the probes as elements of lumped parameters. The study presents calibration of the two-rod probes using the method applied in Open-Ended probes. It consists of measurements in shorted and open states as well as the measurement in a medium of known dielectric properties. All measurements were done using a vector network analyzer of the

frequency range 20 kHz ÷ 8 GHz. Three soils of various texture and moisture were the analysed objects. Due to specificity of the measurement the paper presents the analysis for only one soil. The comparison of the measured data shows that the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity measured by both methods are highly correlated.

Keywords: soil properties, complex dielectric permittivity, Open-Ended probe, two-rod probe

1. Wstęp

Dielektryczny pomiar wilgotności materiałów porowatych, w szczególności gleby wiąże się z wpływem zasolenia na dokładność tego pomiaru. Zasolenie w sposób znaczący degraduje dokładność pomiaru metodami dielektrycznymi i nie może pozostać nieuwzględnione w tego typu pomiarach. Zespolona przenikalność dielektryczna ϵ^* materiału wyraża się wzorem:

$$\epsilon^* = \epsilon' - j(\epsilon'' + \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0}) \quad (1)$$

gdzie: ϵ' opisuje podatność danego materiału do polaryzacji w zewnętrznym polu elektrycznym, ϵ'' wyraża straty dielektryczne związane z procesem polaryzacji dielektrycznej, σ (Sm^{-1}) jest elektryczną konduktywnością gleby, f (Hz) jest częstotliwością pola elektrycznego, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (Fm^{-1}) jest dielektryczną przenikalnością próżni.

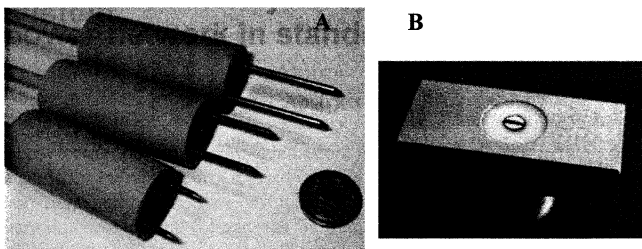
Równie ważnym problemem jest badanie wilgotności w niewielkich objętości materiału, co jest szczególnie istotne w pomiarach laboratoryjnych oraz tam, gdzie konieczna jest rejestracja niewielkich zmian wilgotności wierzchniej warstwy gleby spowodowanych absorpcją pary wodnej lub opadem rosy, przy badaniu bardzo niejednorodnych gleb lub pomiarach przepływu wody w pniu drzew. Typową i najbardziej powszechną dielektryczną metodą pomiaru wilgotności jest metoda reflektometryczna w dziedzinie czasu [3] (TDR – Time Domain Reflectometry). Metoda ta oparta jest na pomiarze prędkości rozchodzenia się impulsu elektrycznego w ośrodku o zmodyfikowanej, poprzez ilość zawartej w nim wody, przenikalności dielektrycznej. Olbrzymią zaletą tej metody jest bardzo niewielki wpływ zasolenia (przewodzenia jonowego) na pomiar prędkości impulsu.

Związane jest to z zakresem widma częstotliwości wchodzących w skład impulsu, przy których wpływ tłumienia impulsu wywołanego przewodzeniem jonowym jest minimalny. Metoda TDR nie jest niestety pozbawiona wad. Jedną z nich jest reakcja na niejednorodności w obrębie sondy pomiarowej umieszczonej

w badanym materiale, mogąca spowodować zafałszowanie pomiaru. Istotny jest również wpływ dyspersji częstotliwościowej, która zmniejsza dokładność pomiaru wskutek rozmycia impulsów odbitych lub zwiększenia czasu narastania ich zbrocza. Konieczne jest też spełnienie wymogu dotyczącego minimalnej długości sondy, która nie może być krótsza niż kilkanaście centymetrów. Alternatywną metodą pomiaru wilgotności jest metoda reflektometryczna w dziedzinie częstotliwości [1] (FDR – Frequency Domain Reflectometry) oparta na pomiarze zespolonej przenikalności dielektrycznej na podstawie współczynnika odbicia zależnego od impedancji obciążenia o charakterze pojemnościowym, jaką sonda umieszczona w badanym dielektryku. W metodzie FDR stosuje się jedną częstotliwość pomiarową. W związku z tym, że wykorzystywane są w niej sondy o krótkich prętach, odporna jest ona na niejednorodności badanego ośrodka oraz umożliwia pomiar w małej objętości materiału, a pomiar przy jednej wartości częstotliwości eliminuje wpływ dyspersji. Niestety pomiar w znacznie niższym zakresie częstotliwości powoduje, że ujawnia się wpływ zasolenia, który jest możliwy do wyeliminowania na drodze kalibracji opisanych poniżej.

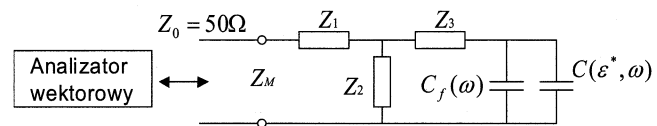
2. Materiały i metody

W pomiarach został wykorzystany wektorowy analizator sieci typu ZVCE firmy Rohde&Schwartz o zakresie częstotliwości pracy od 20 kHz do 8 GHz, przy pomocy którego mierzony był zespolony współczynnik odbicia S_{11} od sondy dwuprętowej umieszczonej w badanym ośrodku. Zmierzony parametr był podstawą do wyznaczenia impedancji obciążenia zamykającej 50Ω kabel koncentryczny. Dla pomiarów sond dwuprętowych analizator skonfigurowany był do pracy w zakresie częstotliwości 10 MHz ÷ 500 MHz, dokonując pomiarów w 99 częstotliwościach, z krokiem 5 MHz i pracując z 11-krotnym uśrednieniem wyników oraz aktywnym filtrem o szerokości pasma 300 Hz. Metodą referencyjną pomiaru impedancji obciążenia była metoda Open-Ended [4], zwana też metodą otwartego końca kabla koncentrycznego. Badane były trzy typy dwuprętowych sond pomiarowych o długościach prętów 1 cm, 2 cm i 3 cm, średnicy pręta 2 mm i rozstawie 13 mm przedstawione na rys. 1A.



Rys. 1. Sondy użyte w pomiarach: A – sondy dwuprętowe, B – sonda Open-Ended
Fig. 1. Probes used in measurements: A – two-rod probes, B – Open-Ended probe

Jako referencyjną metodą pomiarową wykorzystano sondę Open-Ended (rys. 1B) o średnicy wewnętrznej 4 mm i zewnętrznej rdzenia 1,5 mm. Pomiaru wykonano przy częstotliwości 1 GHz. Zarówno dla sondy Open-Ended jak i dla sond dwuprętowych zastosowano ten sam sposób kalibracji oparty na modelu T, opisany w pracy [5]. Model ten sprawdza się bardzo dobrze w zastosowaniu do sond, dla których można przyjąć, że stanowią element o parametrach skupionych, którego analogiem jest kondensator wypełniony stratnym dielektrykiem. Zastosowana kalibracja opiera się na założeniu, że pomiędzy pojemnością ze stratnym dielektrykiem i końcem kabla znajduje się czwórnik dopasowujący typu T (rys. 2) złożony z trzech impedancji Z_1 , Z_2 , Z_3 , których wartości wyznaczane są na etapie kalibracji. Z_M jest impedancją zmierzona przez analizator, C_f – pojemność brzegowa występująca w dielektryku sondy.



Rys. 2. Układ zastępczy sondy pomiarowej
Fig. 2. Equivalent circuit of measuring probe

Impedancję o charakterze pojemnościowym występującą na końcu kabla może zostać opisana wzorem:

$$Z(\epsilon^*, \omega) = [j\omega C_f(\omega) + j\omega C(\epsilon^*, \omega)]^{-1} \quad (1)$$

Zakładając, że pojemność brzegowa może zostać skompensowana poprzez modyfikację wartości impedancji czwórnik Z_1 , Z_2 , Z_3 możemy przyjąć, że:

$$Z(\epsilon^*, \omega) = [j\omega C(\omega)\epsilon^*]^{-1} \quad (2)$$

Po przyjęciu takiego uproszczenia, impedancję obciążenia można dla powyższego modelu wyrazić wzorem:

$$Z_M = Z_1 + \frac{Z_2[Z_3 + Z(\epsilon^*, \omega)]}{Z_2 + Z_3 + Z(\epsilon^*, \omega)} \quad (3)$$

Wzór ten następnie możemy przekształcić do równania liniowego otrzymując:

$$\Delta' + \Delta'_{12}Z(\epsilon^*, \omega) - \Delta'_{23}Z_M = Z_M Z(\epsilon^*, \omega) \quad (4)$$

Gdzie Δ' , Δ'_{12} , Δ'_{23} są zespolonymi współczynnikami równania, w których skład wchodzi kombinacje liniowe impedancji Z_1 , Z_2 oraz Z_3 . Wprowadzając do powyższego wzoru zależność (2) otrzymujemy następujące równanie z trzema niewiadomymi zespolonymi, w którym występują Z_M – impedancja mierzona analizatorem i ϵ^* – zespolona przenikalność dielektryczna.

$$\Delta' + \frac{\Delta'_{12}}{\epsilon^*} + \Delta'_{23}Z_M = \frac{Z_M}{\epsilon^*} \quad (5)$$

Najprostszym sposobem znalezienia parametrów Δ' , Δ'_{12} , Δ'_{23} jest utworzenie i rozwiązanie układu trzech równań, dla których znane są wartości przenikalności dielektrycznej. W tym celu przyjęto trzy punkty kalibracyjne: (i) zwarcie sondy przy pomocy ręki, dla którego przyjęto $\text{Re}(\epsilon^*) = \infty$, $\text{Im}(\epsilon^*) = \infty$, (ii) pomiar w powietrzu $\text{Re}(\epsilon^*) = 1$, $\text{Im}(\epsilon^*) = 0$, (iii) pomiar w acetonie o przenikalności wyznaczonej z modelu Debya [4] o parametrach: $\epsilon_0 = 21,2$; $\epsilon_\infty = 1,9$; $\tau = 3,3 \cdot 10^{-12}$.

Aceton jako materiał do kalibracji sondy Open-Ended został wybrany dlatego, że wartość części rzeczywistej jego przenikalności dielektrycznej jest granicami wartości mierzonych gleb. Dodatkowo materiał ten charakteryzuje się niewielkimi zmianami parametrów dielektrycznych funkcji częstotliwości w rozważanym zakresie częstotliwości, tzn. do 1 GHz.

Materiałem badanym były trzy gleby o zróżnicowanych parametrach fizykochemicznych przedstawionych w tab. 1.

Tab. 1. Lokalizacja i wybrane właściwości fizyczne badanych gleb
Tab. 1. Localization and selected physical parameters of the investigated soils

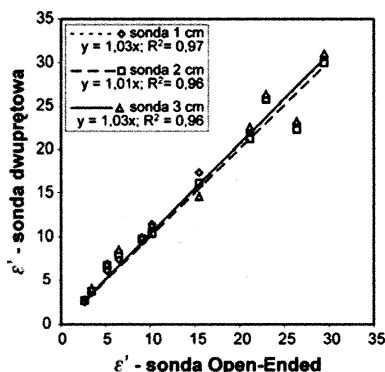
Nr	569	611	622	
Typ gleby	Brunatna	Brunatna	Czarnoziem	
Miejsce pobrania	Majdan Skierbieszowski	Kol. Olempin	Terebin	
Gęstość [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	1,33	1,59	1,4	
Skład granulometryczny według FAO	Piasek [%]	71	94	60
	Pył [%]	25	5	34
	II [%]	4	1	6
Powierzchnia właściwa [$\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$]	21	9	37	

Próbki gleby umieszczone zostały w plastikowych pojemnikach o objętości roboczej 125 ml, a następnie suszone w temperaturze 105°C przez 24 godziny. Zmienne uwilgotnienie uzyskano poprzez dozowanie odpowiednich ilości wody destylowanej do określonej objętości wysuszonej gleby. W celu uzyskania jednorodnego rozkładu wilgotności w każdej próbce, były one szczelnie zamykane w pojemnikach i wygrzewane w temperaturze 45°C przez trzy dni. Na tak przygotowanych próbkach dokonywano pomiarów sondami o różnej długości począwszy od najkrótszej, a ostatni pomiar wykonywany był przy użyciu sondy Open-Ended.

Częstotliwość pomiarowa została dobrana na podstawie pomiaru kąta współczynnika odbicia S_{11} dla sondy zanurzonej w wodzie destylowanej, który w tym przypadku nie powinien przekraczać 180 stopni. W celu uniknięcia występowania efektów falowych do pomiarów przyjęto częstotliwości, dla których długość fali jest ok. 80 razy większa niż długość prętów czyli odpowiednio dla sond 1 cm – 375 MHz, 2 cm – 190 MHz, 3 cm – 125 MHz. Podczas wykonywania pomiarów zaobserwowano, że zmiany położenia kabla połączeniowego lub sondy zmniejszają dokładność pomiaru wywołując wzrost błędu pomiaru kąta współczynnika odbicia na poziomie 1 stopnia. W związku z tym zastosowano mocowanie sondy w statywie i unieruchomienie kabla połączeniowego.

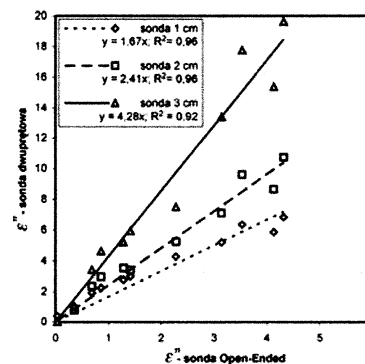
3. Wyniki i dyskusja

Na wykresie z rys. 3 można zaobserwować dobrą korelację pomiędzy wynikami pomiarów części rzeczywistej przenikalności dielektrycznej w glebie 622, które dokonano dwoma typami sond. Widać, że jest ona niezależna zarówno od typu sondy, długości sondy dwuprętowej i co ważniejsze od wybranej częstotliwości pomiarowej, co świadczy o tym że wykonane kalibracje spełniają swoje zadanie dla sond dwuprętowych. Należy zaznaczyć, że sfera czułości sondy Open-Ended jest znacznie płytsza niż dla sondy dwuprętowej, szczególnie od tej długości 3 cm. Zatem ze względu na możliwą niejednorodność rozkładu wilgotności w badanych próbkach glebowych zauważony rozproszenie wyników wokół prostej 1 : 1.



Rys. 3. Porównanie części rzeczywistej zespolonej przenikalności dielektrycznej z pomiaru sondą Open-Ended i sondami dwuprętowymi dla gleby 622
Fig. 3. Comparison of real parts of the complex dielectric permittivity measured with the Open-Ended and two-wire probes for the soil 622

Część urojona przedstawiona na rys. 4 wykazuje się zróżnicowaniem ze względu na rodzaj użytej sondy. Można zaobserwować tutaj również wpływ częstotliwości pomiarowej. Zgodnie ze wzorem (1) na zespoloną przenikalność dielektryczną stratnych dielektryków część urojona złożona jest z dwóch elementów opisujących stratność w dielektryku: związanym z polaryzacją cząsteczek materiału w polu elektrycznym i związanym z konduktywnością elektryczną (jonową). Zakładając, że wartość stratności związana z polaryzacją ϵ'' jest równa zero, możemy przyjąć, że za zmianę wartości mierzonej odpowiedzialna jest częstotliwość, co jest zgodne z wykresami na rys. 4, gdzie wartości mierzone są odwrotnie proporcjonalna do częstotliwości pomiaru.



Rys. 4. Porównanie części urojonych zespolonej przenikalności dielektrycznej z pomiaru sondą Open-Ended i sondami dwuprętowymi dla gleby 622
Fig. 4. Comparison of imaginary parts of the complex dielectric permittivity measured with the Open-Ended and two-wire probes for the soil 622

W pracy nie zamieszczono wyników pomiarów gleb 569 i 611 które wykazują się znacznie gorszą korelacją. Związane jest to z brakiem możliwości wielokrotnego powtarzania pomiarów gdyż, aby wykonać pomiar konieczne jest otwarcie pojemnika, z którego w ciągu 1 min. odparowuje ok. 20 mg wody. Dodatkowo, wydrążone przez pręty sondy otwory w sposób naturalny zmieniają zagęszczenie gleby. Pomiary sondą Open-Ended obciążone są wpływem parowania z powierzchni gleby oraz zmianą gęstości spowodowaną dociskaniem sondy do powierzchni gleby.

Planowane jest wykonanie pomiarów ϵ'' w roztworach wodnych alkoholu lub benzenu w acetonie przy pomocy przedstawionych sond. Roztwory, jako jednorodne media nie wprowadzają błędów wynikających z niejednorodności gleby. W ten sposób uzyskamy dodatkową informację o przydatności omawianych sond.

4. Wnioski

- Wykonane kalibracje, które oryginalnie zastosowane były do sondy Open-Ended, sprawdzają się dla sond dwuprętowych.
- Wartości wyznaczonych z pomiaru sondami dwuprętowymi oraz sondą Open-Ended części rzeczywistej zespolonej przenikalności dielektrycznej badanej gleby, będącej wskaźnikiem jej wilgotności, są dobrze skorelowane,
- Wartości wyznaczonych z pomiaru sondami dwuprętowymi oraz sondą Open-Ended części urojonej zespolonej przenikalności dielektrycznej badanej gleby, będącej wskaźnikiem jej zasolenia, są dobrze skorelowane, co jest podstawą do kontynuacji prac nad sondami dwuprętowymi, jako czujnikami zasolenia materiałów porowatych.

5. Literatura

- [1] Heimovaara T.J.: Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms, 1- Measurements of complex dielectric permittivity of soils. *Water Resources Res.*, 30, 1994, 189-199.
- [2] Malicki M.A., Skierucha W.: Zagadnienie doboru częstotliwości pola elektrycznego w dielektrycznym pomiarze wilgotności gleb zasolonych. *Acta Agrophysica*. 53, 2001, str. 109-115.
- [3] Skierucha W., Malicki M.A.: TDR method for the measurement of moisture in porous media. IA PAN Lublin, ISBN 83-87385-95-6, 2004, pp. 1-150.
- [4] Skierucha W., Walczak R.T., Wilczek A.: Comparison of Open-Ended Coax and TDR sensors for the measurement soil dielectric permittivity in microwave frequencies. *Int. Agrophysics*, 18(4), 2004, pp. 355-362.
- [5] Yan-Zhen Wei, Sridhar, S.: Technique for measuring the frequency-dependent complex dielectric constants of liquids up to 20 GHz. *Rev. Sci. Instrum.* 60, 1989, pp. 3041-3046.

Artykuł recenzowany

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyki w latach 2004-2007, jako projekt badawczy zamawiany PBZ-KBN-098/T09/2003.