

Andrzej WILCZEK, Wojciech SKIERUCHA
 INSTYTUT AGROFIZYKI PAN, ul. Doświadczalna 4, 20-290 Lublin

Reflektometria częstotliwościowa jako selektywna metoda pomiaru wilgotności gleby

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: a.wilczek@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@ipan.lublin.pl



Streszczenie

W niniejszej pracy zbadano wpływ zasolenia gleby na selektywność pomiaru jej wilgotności wykonanego metodą reflektometrii częstotliwościowej. W pracy podjęto próbę opracowania i oceny nowej sondy dwuprętowej. W oparciu o zjawisko transformacji impedancji opracowano model sondy umożliwiający pomiar widma do częstotliwości 500 MHz. Metodą referencyjną pomiaru wilgotności był pomiar termogravimetryczny. Z pomiarów wynika, że dla pasma powyżej 300 MHz zastosowana metoda pozwala na selektywny pomiar wilgotności gleby.

Słowa kluczowe: wilgotność gleby, zespolona przenikalność dielektryczna, reflektometria częstotliwościowa.

Frequency domain reflectometry as a selective method for soil moisture measurement

Abstract

The paper presents investigations of the influence of soil salinity on moisture measurements. The measurements were made by the (FDR) frequency domain reflectometry method. This method allows obtaining the frequency spectrum of complex dielectric permittivity when using the presented electrical model of the applied probe. Application of dielectric spectroscopy methods to analysis of results enables obtaining other information, besides moisture and salinity, about investigated soils. There is presented the use of a two-rod probe and its evaluation from the point of view of soil moisture selective measurements. An electrical model of the probe was formulated basing on the impedance transformation phenomenon in symmetrical waveguides. This model allows achieving 500 MHz frequency band unavailable till now for two-rod probes in commercial devices. Black earth soil type samples from Annopol were investigated. All measurements were taken with a vector network analyzer ZVCE produced by Rohde&Schwarz. The measured complex reflection coefficient S11 from the probe was used to obtain 10-500 MHz frequency spectrum of complex dielectric permittivity. The thermogravimetric measurement method of soil volumetric water content was used as the reference one. Five series of ten soil samples of different moisture and electrical conductivity values were analysed. The results show that the described FDR method allows measuring soil moisture selectively above 300 MHz.

Keywords: soil moisture, complex dielectric permittivity, frequency domain reflectometry.

1. Wstęp

W dielektrycznych pomiarach wilgotności wykorzystywane są szczególnie właściwości dielektryczne cząsteczek wody związane z jej budową polarną, czyli występowaniem niezrównoważonego momentu dipolowego o wartości $6,2 \cdot 10^{-30}$ C/m. Dipole cząsteczek wody na skutek ruchu cieplnego ułożone są chaotycznie. Po przyłożeniu zewnętrznego pola elektrycznego cząsteczki wody ulegają polaryzacji obracając się tak, aby ich dipole były skierowane

rownoległe do linii tego pola. Wartość przenikalności dielektrycznej wody wynosi 80,14 w temperaturze 20°C, co wyróżnia ją spośród innych składników będących elementami ośrodka porowatego, których przenikalność dielektryczna jest znacznie mniejsza. Dlatego istotą dielektrycznych pomiarów wilgotności materiałów porowatych jest wykorzystanie silnej zależności między zawartością wody w badanym materiale i jego współczynnikiem załamania definiowanym jako pierwiastek kwadratowy z części rzeczywistej zespolonej przenikalności dielektrycznej [1]. Po wszechnie uznaną dielektryczną metodą pomiaru wilgotności gleby jest metoda reflektometryczna TDR (ang. Time Domain Reflectometry) [2, 3]. W metodzie tej analizowany jest czas pomiędzy charakterystycznymi punktami sygnału odbitego od sondy dwu lub wieloprętowej. Z pomiaru czasu wyliczana jest tzw. pozorna przenikalność dielektryczna, która jest wielkością rzeczywistą dla pasma częstotliwości dominujących w widmie impulsu pomiarowego. Mikrofalowy zakres częstotliwości widma używanych impulsów zapewnia tej metodzie bardzo dobrą selektywność pomiaru. Metoda ta pomimo swoich zalet wymaga jednak zastosowania kosztownego sprzętu pomiarowego. Alternatywną metodą pomiaru jest wykorzystana w pracy metoda FDR (ang. Frequency Domain Reflectometry) [4]. Metoda ta w zastosowaniu do gleb najczęściej wykorzystuje sondy pomiarowe o krótszych prętach niż w metodzie TDR co pozwala na uniknięcie konieczności modelowania zjawisk falowych oraz wykorzystuje tylko jedną częstotliwość z zakresu 10-200 MHz [5]. Z tego powodu sondy tego typu nie pozwalają na wykonanie analizy selektywności pomiaru w zależności od częstotliwości sygnału. Zespoloną przenikalność dielektryczną ϵ gleby można wyrazić wzorem [6]:

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

gdzie: $\epsilon'(f)$ – część rzeczywista przenikalności dielektrycznej, $\epsilon''(f)$ – część urojona, σ (S/m) – elektryczna konduktywność gleby, f (Hz) – częstotliwość pola elektrycznego, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ (F/m) – przenikalność dielektryczna próżni.

Z wzoru tego wynika, że obie składowe przenikalności dielektrycznej zależą od częstotliwości sygnału pomiarowego a ponadto na część urojoną w sposób odwrotnie proporcjonalny do częstotliwości wpływa elektryczna konduktywność gleby. Wynika stąd, że im niższa częstotliwość sygnału pomiarowego tym mniejsza może okazać się selektywność pomiaru wilgotności. W celu otrzymania widma metodą FDR dotychczas stosowano sondę współosiową z otwartym końcem [7,8]. Sonda współosiowa w zastosowaniu do gleby może być wykorzystana tylko w laboratorium ze względu na dużą wrażliwość na kontakt powierzchniowy z glebą oraz niezwykle małą strefę czułości. W niniejszej pracy zastosowano sondę dwuprętową pozbawioną powyższych wad lecz konieczne okazało się opracowanie modelu opisującego

sondę pomiarową tak aby przy jej pomocy otrzymać widmo przenikalności dielektrycznej, a następnie zbadać selektywność pomiaru wilgotności gleby względem jej zasolenia w różnych zakresach częstotliwości. Pomiar opracowaną metodą FDR nie wymagają przekształceń matematycznych Fouriera, jak w przypadku analizy sygnału TDR i umożliwiają po odpowiednich kalibracjach bezpośrednie wyznaczenie widma częstotliwościowego zespolonej przenikalności dielektrycznej, przy zachowaniu kontrolowanej amplitudy sygnału pomiarowego. Pomiar widma pozwala na zastosowanie metod spektroskopii dielektrycznej w analizie wyników, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie innych poza wilgotnością i zasoleniem informacji o badanym ośrodku np. o wpływie wody związanej lub składu granulometrycznego. Z tego względu metoda ta ma dodatkowe zastosowanie do badania i oceny jakości materiałów porowatych pochodzenia rolniczego na podstawie ich właściwości dielektrycznych. Wybór metody FDR podyktowany był także możliwością zbudowania przyrządu pomiarowego znacznie prostszego i tańszego od jego odpowiednika pracującego w technice TDR.

2. Materiał i metody

Materiał glebowy

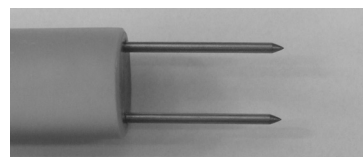
Materiałem badanym była próbka czarnej ziemi pochodząca z Annopola. Gleba ta znajduje się w banku gleb Polski zebrany w IAPAN [9] w Lublinie i posiada nadany numer 529. Badana gleba pobrana została z głębokości ok. 70 cm w związku z tym w jej składzie granulometrycznym występowała wyłącznie frakcja piasku. Charakteryzowała się ona niską zawartością materii organicznej poniżej 0,7%. Gęstość tej gleby wynosi 1,76 g/cm³, powierzchnia właściwa 8 m²/g, a wilgotność nasycenia 0,27. Glebę tą wybrano tak aby na wielkość mierzonej przenikalności dielektrycznej wpływały w minimalnym stopniu czynniki inne niż wilgotność i zasolenie. Takimi czynnikami mogą być np. pęcznienie lub duża zawartość składników pochodzenia organicznego. Aby zbadać wpływ zasolenia przygotowano 5 serii po 10 próbek gleby, które umieszczone zostały w plastikowych pojemnikach o objętości roboczej 125 ml, a następnie suszone w temperaturze 105°C przez 24 godziny. Dla każdej serii wilgotność próbek zmieniano równomiernie co 0,1 wilgotności nasycenia poprzez dozowanie odpowiednich ilości roztworu do określonej objętości wysuszonej gleby. W celu uzyskania zmiennego zasolenia, do uwilgotnienia każdej serii próbek użyto roztworów KCl o wartościach konduktywności elektrycznej 0, 5, 10, 15 i 20 dS/m. Aby uzyskać jednorodny rozkład wilgotności w każdej próbce, były one szczelnie zamykane w pojemnikach i wygrzewane w temperaturze 45°C przez okres trzech dni. Na tak przygotowanych próbkach dokonywano pomiarów widma zespolonej przenikalności dielektrycznej.

Przyrząd pomiarowy

Pomiary wykonywano przy pomocy wektorowego analizatora sieci typu ZVCE firmy Rohde&Schwartz umożliwiającego wykonywanie pomiarów w zakresie od 20 kHz do 8 GHz. Analizatorem mierzono zespolony współczynnik odbicia S11 od sondy dwuprętowej umieszczonej w badanym ośrodku. Zmierzony parametr był podstawą do wyznaczenia widma zespolonej przenikalności dielektrycznej badanego ośrodka przy zastosowaniu odpowiedniego modelu i metodyki kalibracyjnej. Analizator skonfigurowano do pracy w zakresie częstotliwości 10 – 500 MHz, tak aby pomiary wykonywane były w 99 częstotliwościach, z krokiem 5 MHz, dodatkowo założono 11-krotne uśrednienie wyników oraz filtr aktywny o szerokości pasma 300 Hz. Przed pomiarami port do, którego podłączono sondę pomiarową został skalibrowany kalibratorami firmy Rosenberger na zwarcie, rozwarciu oraz obciążeniu 50 Ω. Parametry konfiguracyjne zostały dobrane pod kątem uzyskania optymalnej dokładności i szybkości pomiarów.

Sonda pomiarowa

Do badań użyto specjalnie zaprojektowaną sondę dwuprętową (rys.1). Sonda zbudowana została z dwóch prętów ze stali nierdzewnej o średnicy 2 mm, długości 30 mm i rozstawie 13 mm. Wybór ten został podyktowany możliwością porównania wyników pomiarów uzyskanych metodami FDR i TDR dzięki zastosowaniu sondy o identycznej geometrii różniącej się jedynie długością prętów w odniesieniu do sondy połowej TDR typu FP/mts produkowanej w IAPAN. Sondy TDR o tak krótkich prętach nie są stosowane ze względu na ograniczenia stawiane przez metodę pomiarową.



Rys. 1. Sonda dwuprętowa stosowana w pomiarach
Fig. 1. Two-rod probe used for measurements

Komercyjnie oferowane przyrządy TDR o czasie narastania impulsu 200 ps mogą być wykorzystywane do pracy z sondami o długości prętów nie mniejszych niż 5 cm. Sondy FDR o krótkich prętach mogą wypełnić lukę dla tego typu czujników dielektrycznych występującą pomiędzy metodą otwartego końca linii koncentrycznej (open-ended) [10] i sondami TDR.

Model sondy pomiarowej

Model oparto o analizę zjawisk falowych występujących w stratnej linii długiej. Otwarte pręty (linii symetrycznej) sondy umieszczonej w stratnym dielektryku jakim jest gleba o zespolonej przenikalności dielektrycznej ϵ zostały zamodelowane jako stratny transformator impedancji. Do opisu impedancji wejściowej sondy Z_L wykorzystano zjawisko transformacji impedancji otwartego końca sondy Z_K w linii długiej o długości x oraz zespolonych parametrach stałej propagacji γ i impedancji charakterystycznej Z_C . Wzór opisujący transformację impedancji Z_K na impedancję początku prętów sondy ma postać [11]:

$$Z_L = Z_C \frac{Z_K + Z_C \operatorname{tgh} \gamma x}{Z_C + Z_K \operatorname{tgh} \gamma x} \quad (2)$$

Przyjmując założenia, że:

- otwarty koniec sondy przedstawia dużą rezystancję $Z_K = 10 \text{ M}\Omega + j0 \Omega$,
- gleba jest ośrodkiem paramagnetycznym o względnej przenikalności magnetycznej $\mu_r = 1$, zatem indukcyjność jednostkowa prętów L jest stała i niezależna od rodzaju badanego materiału,
- rezystancja jednostkowa R prętów sondy jest równa zeru,
- pojemność jednostkową C można zastąpić stratną pojemnością jednostkową równą $C_0 \epsilon$, której wprowadzenie pozwala na wyeliminowanie konduktywności G (C_0 - pojemność jednostkowa w powietrzu, ϵ - zespolona przenikalność dielektryczna gleby)

Dla powyższych założeń znane wzory [11] opisujące stałą propagacji i impedancję charakterystyczną ulegają uproszczeniu do postaci:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \Rightarrow \gamma = \frac{j\omega}{c} \sqrt{\epsilon} \quad (3)$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \Rightarrow Z_C = \frac{Z_{air}}{\sqrt{\epsilon}} \quad (4)$$

gdzie: $\omega = 2\pi f$ prędkość kątowa, R, L, G, C - parametry jednostkowe linii długiej, j - jednostka urojona, c - prędkość światła w próżni, Z_{air} - Impedancja charakterystyczna prętów sondy w powietrzu.

Na podstawie parametrów geometrycznych prętów sondy traktowanych jako linię symetryczną można wyznaczyć ich impedancję charakterystyczną Z_{air} w powietrzu, która w tym przypadku wynosi 307Ω . Znając parametry linii długiej γ i Z_C oraz wykorzystując zależność opisującą transformację impedancji można wyznaczyć impedancję prętów sondy Z_L umieszczonych w stratnym dielektryku opisywanym zespoloną przenikalnością dielektryczną gleby ϵ . Po wprowadzeniu (3) i (4) do wzoru (2) przyjmuje on postać:

$$Z_L = \frac{Z_K + \frac{Z_{air}}{\sqrt{\epsilon}} \operatorname{tgh}\left(\frac{j\omega x \sqrt{\epsilon}}{c}\right)}{1 + \frac{Z_K}{Z_{air}} \sqrt{\epsilon} \operatorname{tgh}\left(\frac{j\omega x \sqrt{\epsilon}}{c}\right)} \quad (5)$$

Z powyższego wzoru łatwo jest wyznaczyć impedancję prętów Z_L o długości x znając zespoloną przenikalność dielektryczną ϵ , natomiast dużo trudniej jest wyznaczyć funkcję odwrotną czyli $\epsilon = f(Z_L)$. Z tego powodu pozostawiono problem znalezienia rozwiązania analitycznego i postanowiono zastosować numeryczną metodę kolejnych przybliżeń do znalezienia poszukiwanej zespolonej przenikalności dielektrycznej ϵ z równania (5).

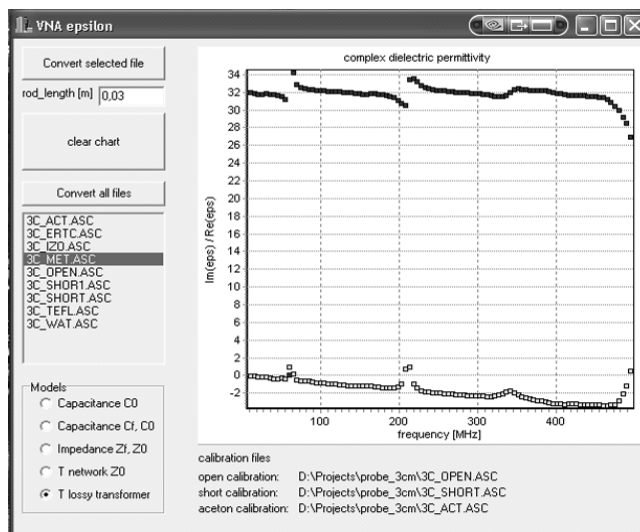
Potraktowanie prętów sondy jako stratny transformator impedancji zapewnia niezależność wyniku uzyskanej wartości przenikalności dielektrycznej od długości prętów, lecz pojawiają się problemy z jednoznacznością otrzymanych wyników pomiarów. Z analizy opisywanego modelu wynika że przy określonej częstotliwości sygnału pomiarowego dla zmierzonego współczynnika odbicia można wyznaczyć więcej niż jedną wartość przenikalności dielektrycznej. Taka sytuacja ma miejsce wtedy, gdy długość fali sygnału pomiarowego jest mniejsza od długości elektrycznej prętów sondy w ośrodku o największej występującej w pomiarach przenikalności dielektrycznej. Do rozwiązania problemu niejednoznaczności wykorzystano fakt, że dla danej długości prętów sondy występuje częstotliwość graniczna poniżej, której występuje tylko jedno rozwiązanie równania (5). Powyżej tej częstotliwości można zastosować śledzenie rozwiązania poprzez zawężenie granic jego zmienności w oparciu o wyznaczone rozwiązanie w niższej częstotliwości. Zawężenie granic zmienności zapewnia uzyskanie jednoznaczności rozwiązania równania i a zatem prawidłowego wyznaczenia przenikalności dielektrycznej.

Na podstawie powyższych rozważań opracowano program komputerowy wykorzystujący metodę kolejnych przybliżeń.

Oprogramowanie

Otrzymane dane pomiarowe przetworzono programem VNA epsilon (rys. 2) opracowanym przez autorów niniejszej pracy przy pomocy kompilatora Builder C++ z pakietu Borland Developer Studio 2006 firmy Borland.

Zadaniem programu jest import plików pomiarowych i kalibracyjnych z wektorowego analizatora sieci. Na ich podstawie program wylicza parametry kalibracyjne, a następnie wyznacza metodą kolejnych przybliżeń wszystkie punkty widma obu składowych zespolonej przenikalności dielektrycznej. Zastosowano standardową 3-punktową metodę kalibracji stosowaną w tego typu pomiarach, a więc zwarcie prętów u nasady, pomiar w powietrzu oraz w acetonie. Ze względu na ewolucyjny charakter programu pozwala on także na wyznaczanie zespolonej przenikalności dielektrycznej dla innych prostszych modeli nieopisanych w niniejszej pracy. Program wyposażony został w opcję podglądu i nakładania widm uzyskanych z wybranych plików co umożliwia łatwą weryfikację wykonanych kalibracji. Dodatkową cechą programu jest możliwość przetwarzania całych katalogów z plikami pomiarowymi co ułatwia obróbkę dużej ilości danych pomiarowych. W przyszłości planowane jest wyposażenie programu w opcję prostej analizy wielu widm oraz implementację nowych modeli sond pomiarowych.



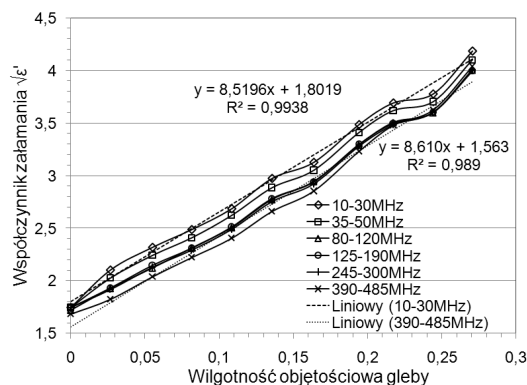
Rys. 2. Program do kalibracji i wyliczania widma obu składowych zespolonej przenikalności dielektrycznej

Fig. 2. Program for calibration and calculation of the complex dielectric permittivity spectrum

3. Wyniki i dyskusja

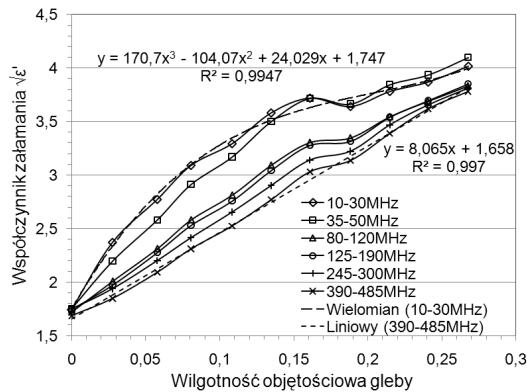
Analizując wyniki pomiarów próbek glebowych metodą FDR można zauważyć, że wraz z częstotliwością sygnału pomiarowego zmienia się korelacja pomiędzy współczynnikiem załamania czyli pierwiastkiem kwadratowym z części rzeczywistej zespolonej przenikalności dielektrycznej, a wilgotnością zmierzona metodą termograwimetryczną. Zależnie od częstotliwości sygnału pomiarowego obserwowany jest wpływ relaksacji cząstek koloidalnych lub wody związanej. Analizę wpływu częstotliwości na wynik pomiaru przeprowadzono porównując uśrednione wartości współczynnika załamania dla sześciu wybranych pasm widma. Były to pasma: 10-30, 35-50, 80-120, 125-190, 245-300, 390-485 MHz.

Dla gleby nawilżanej wodą destylowaną można zaobserwować (rys. 3), że wraz ze spadkiem częstotliwości wartość współczynnika załamania rośnie o stałą wartość dla całego zakresu wilgotności (wpasowane linie trendu są prawie równoległe), przy czym zostaje zachowana liniowa zależność od wilgotności, co świadczy o tym, że dla badanej niezasolonej gleby wyniki uzyskane metodami niskoczęstotliwościowymi mogą być porównywalne z wynikami uzyskanymi metodami wysokoczęstotliwościowymi. Dla wszystkich pasm wyznaczono linie trendu, dla których współczynnik determinacji R^2 był nie mniejszy niż 0,989. W celu zachowania czytelności na rysunku 3 zaznaczono tylko linie trendu skrajnych pasm częstotliwości.



Rys. 3. Wpływ częstotliwości sygnału pomiarowego na korelację współczynnika załamania i wilgotności objętościowej gleby niezasolonej

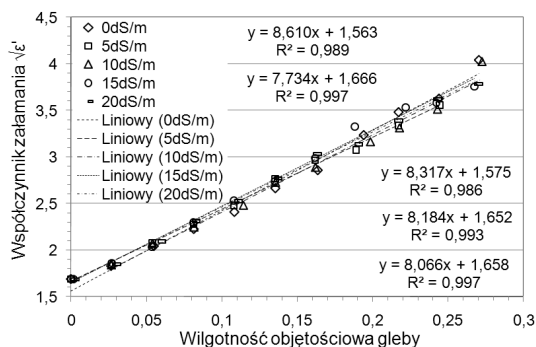
Fig. 3. Influence of the measurement signal frequency on correlation between the refractive index and volumetric water content of non-saline soil



Rys. 4. Wpływ częstotliwości sygnału pomiarowego na korelację współczynnika załamania i wilgotności objętościowej gleby nawilżanej roztworem KCl o elektrycznej przewodności 20 dS/m

Fig. 4. Influence of the measurement signal frequency on correlation between the refractive index and volumetric water content of soil wetted by KCl solution of 20 dS/m electrical conductivity

W przypadku gleby nawilżanej roztworem KCl o przewodności 20 dS/m zachowanie współczynnika załamania jest zupełnie inne (rys.4). Widać, że im niższa częstotliwość pomiaru tym bardziej zniekształcona i zawyżona jest wartość współczynnika załamania dla tej samej wilgotności próbki. Dla pasma 390-485 MHz zależność od wilgotności opisuje funkcja liniowa o współczynniku determinacji $R^2=0,997$, natomiast dla pasma 10-30 MHz należy użyć wielomianu 3-go stopnia aby uzyskać zbliżoną wartość współczynnika determinacji $R^2=0,994$. Oznacza to, że w przypadku badanej gleby zasolonej wynik pomiaru wykonanego metodami niskoczęstotliwościowymi obarczony jest znacznie większym błędem niż dla tej samej gleby niezasolonej. Zniekształcenie charakterystyki niskoczęstotliwościowej (pasma 10-30 MHz) może być eliminowane na drodze indywidualnej kalibracji dla danego typu gleby. Należy jednak pamiętać, że kształt tej charakterystyki nadal zależy od poziomu zasolenia (brak selektywności w przypadku zmiany zasolenia). O ile samo zasolenie może nie ulec zmianie w czasie eksperymentu, to ulegnie zmianie elektryczna przewodność gleby, która silnie zależy od temperatury. Widać tutaj wyraźną zaletę wysokoczęstotliwościowych dielektrycznych metod pomiaru wilgotności gleby, których duża selektywność w znacznym stopniu zmniejsza podatność uzyskanych wyników na wpływ elektrycznej przewodności. Cecha ta jest szczególnie ważna w pomiarach polowych, dla których niemożliwe jest utrzymywanie stałej temperatury.



Rys. 5. Zależność współczynnika załamania od wilgotności objętościowej dla gleby nawilżanej roztworami KCl o różnych wartościach elektrycznej przewodności

Fig. 5. Dependence of refractive index on volumetric water content of soil wetted by KCl solution of different electrical conductivity

Selektywność metody pomiarowej jest jedną z najważniejszych cech metodycznych. Aby ją określić należy wykonać pomiar w warunkach kontrolowanej zmienności wielkości zakłócającej. W rozważanym przypadku dokonano weryfikacji selektywności pomiaru współczynnika załamania dla badanej gleby przy zmie-

niającym się zasoleniu próbek, co uzyskano stosując zmienną przewodność roztworu nawilżającego w zakresie 0-20 dS/m. Wyniki pomiarów przedstawia rysunek 5. Na wykresie widać, że współczynnik załamania skorelowany jest liniowo z wilgotnością objętościową gleby, a rozrzut punktów pomiarowych może wynikać z niejednorodności próbek glebowych. Wysoki współczynnik korelacji dla wszystkich pięciu stopni zasolenia oraz bardzo niewielka zmienność kąta nachylenia prostych świadczy o zaniedbywalnym wpływie zasolenia na mierzony współczynnik załamania potwierdzając wysoką selektywność metody, podobnie jak ma to miejsce dla metody TDR.

4. Wnioski

- Stwierdzono, że dla badanej gleby mierzone wartości części rzeczywistej przenikalności dielektrycznej w zakresie niskich częstotliwości są zawyżone względem wyznaczonych w zakresie wysokich częstotliwości, szczególnie dla gleby nawilżanej roztworem o dużej przewodności elektrycznej.
- Nie stwierdzono wpływu zasolenia próbek glebowych na dokładność pomiaru części rzeczywistej przenikalności dielektrycznej mierzonej w zakresie 390-485 MHz.
- Opracowany model sondy dwu-prętowej dzięki uwzględnieniu zjawisk falowych umożliwia pomiar widma w zakresie do 500 MHz, dotychczas niedostępnym dla przyrządów komercyjnych w zastosowaniu do pomiaru wilgotności i zasolenia gleb.

5. Literatura

- [1] Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P.: Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, vol. 16, (1980),574-582.
- [2] Malicki M.A., Skierucha W.: A manually controlled TDR soil moisture meter operating with 300ps rise-time needle pulses, *Irrigation Science*, 10 (1989), 153-163.
- [3] Sławiński C., Sobczuk H., Stoffregen H., Walczak R., Wessolek G.: Effect of data resolution on soil hydraulic conductivity prediction, *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 165 (2002), 45-49.
- [4] Heimovaara T.J.: Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms, 1- Measurement of the complex dielectric permittivity of soils. *Water. Res. Res.*, 30 (1994),189-199.
- [5] User Manual for the SM200 Soil Moisture Sensor. Delta-T Devices Ltd. (2006).
- [6] Ramo S., Whinnery J.R., Van Duzer T.: *Fields and waves in communication electronics*, 3rd ed. John Wiley (1994).
- [7] Stuchly M.A., Stuchly S.S.: Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies- a review. *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. IM-29, no.3,(1980),176-182.
- [8] Athey TW, Stuchly MA, Stuchly SS: Measurement of radio frequency permittivity of biological tissues with an open-ended coaxial line: part I. *IEEE Trans. Microwave Theory and Tech.*, MTT-30, (1982) 82-86.
- [9] Gliński J., Ostrowski J., Stępniewska Z., Stępniewski W.: Bank próbek glebowych reprezentujących gleby mineralne Polski, *Probl. Agrofizyki*, 66 (1991),1-157.
- [10] Skierucha W., Walczak R., Wilczek A.: Comparison of Open-Ended Coax and TDR sensors for the measurement of soil dielectric permittivity in microwave frequencies, *Int. Agrophysics*, 18 (2004), 355-362.
- [11] Dobrowolski J. A.: *Technika wielkich częstotliwości*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, (2001), 21.